

**Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2012

Rostislav NEIDHARDT

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program: Strojírenství

Zaměření: Obrábění a montáž

## **NÁVRH MĚŘENÍ SOUBORŮ VELIČIN A PARAMETRŮ PROCESU BROUŠENÍ NA BRUSCE BPH 320A**

### **PROPOSAL FOR MEASURING SETS OF QUANTITIES AND PARAMETERS OF THE GRINDING PROCESS ON THE BPH 320A GRINDER**

**KOM – 1167**

***Rostislav Neidhardt***

Vedoucí práce: Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Konzultant: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.  
Ing. Jaroslav Votoček

Počet stran: 56

Počet příloh: 5

Počet tabulek: 2

Počet obrázků: 32

03.01.2012

## **NÁVRH MĚŘENÍ SOUBORŮ VELIČIN A PARAMETRŮ PROCESU BROUŠENÍ NA BRUSCE BPH 320A**

### *ANOTACE:*

Cílem bakalářské práce je návrh systému měření rozhodujících fyzikálních veličin procesu broušení na brusce BPH 320A.

Hlavním úkolem je určit rozhodující fyzikální veličiny rovinného broušení obvodem kotouče a následně vytvořit systém pro jejich měření. K měření a vyhodnocování musí docházet přímo v průběhu obrábění.

Poté navrhnout experiment pro ověření měřicího systému a zhodnotit získané výsledky.

## **PROPOSAL FOR MEASURING SETS OF QUANTITIES AND PARAMETERS OF THE GRINDING PROCESS ON THE BPH 320A GRINDER**

### *ANNOTATION:*

The objective of the bachelor's thesis is the proposal of the measuring system of important physical quantities of the grinding process on the BPH 320A grinder.

The main task is to identify the key physical quantities of the flat-surface grinding by the abrasive disc periphery, and hence establish a system for their measuring. Measuring and evaluation must take place directly in the tooling process.

Then an experiment should be proposed to verify the measurement system, and the results will be evaluated.

**Klíčová slova:** OBRÁBĚNÍ, ROVINNÉ BROUŠENÍ, MĚŘENÍ

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2012

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 56

Počet příloh: 5

Počet tabulek: 2

Počet obrázků: 32

## ***MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ***

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

03.01.2012

.....

Rostislav Neidhardt

## ***PODĚKOVÁNÍ***

Tímto bych chtěl poděkovat ctěné Ing. Štěpánce Dvořáckové, Ph.D. za odborné vedení při zpracování bakalářské práce a za velmi přínosné připomínky. Za cenné rady děkuji též Doc. Ing. Jaromírovi Gazdovi, CSc. a Ing. Jaroslavu Votočkovi. Dále děkuji Doc. Ing. Miroslavu Svobodovi, CSc. za úpravu vývojového prostředí LabVIEW a celé Katedře obrábění a montáže za pomoc při realizaci experimentální části této práce.

Zvláštní poděkování patří i mé matce Daně Neidhardtové a mé sestře Ing. Markétě Neidhardtové za jejich bezmeznou podporu během celého studia na této škole.

## Obsah

1. Úvod .....	10
2. Teoretická část .....	12
2.1 Broušení .....	12
2.1.1 Tvoření třísky při broušení .....	12
2.1.2 Druhy broušení .....	13
2.1.3 Broušící nástroje .....	13
2.1.3.1 Broušící materiály .....	14
2.1.3.2 Zrnitost brusiva .....	15
2.1.3.3 Tvrdost broušících nástrojů .....	15
2.1.3.4 Struktura broušících nástrojů .....	16
2.1.3.5 Pojiva broušících nástrojů .....	17
2.1.4 Vyvažování broušících kotoučů .....	17
2.1.5 Upínání broušících kotoučů .....	18
2.1.6 Orovňávání broušících kotoučů .....	18
2.1.7 Řezné síly při broušení .....	19
2.1.8 Tepelné jevy při broušení .....	20
2.2 Hodnocení procesu broušení .....	21
2.2.1 Brusný poměr .....	21
2.3 Trvanlivost nástroje při broušení .....	22
3. Způsoby měření rozhodujících fyzikálních veličin procesu broušení na brusce BPH 320A .....	23
3.1 Rovinné broušení .....	23
3.2 Určení odebraného materiálu .....	23
3.2.1 Měření úbytku pomocí pneumatického snímače .....	24
3.2.2 Měření úbytku pomocí tenzometru .....	24
3.2.3 Měření úbytku pomocí indukčního snímače .....	24
3.3 Opotřebení nástroje určené jeho spotřebou .....	24
3.3.1 Metoda s použitím mikrovln .....	25
3.3.2 Metoda s použitím bezdotykového pneumatického snímače .....	25
3.4 Měření řezné síly nebo kroutícího momentu .....	25
3.4.1 Přímé měření řezných sil .....	25

3.4.1.1 Metoda s použitím tenzometrického dynamometru .....	26
3.4.1.2 Metoda s použitím piezoelektrického dynamometru .....	26
3.5 Měření teploty v oblasti řezání pro broušení .....	27
3.5.1 Přirozený termočlánek .....	27
3.5.2 Umělý termočlánek .....	27
3.6 Měření zvuku .....	28
3.6.1 Pomocí akcelerometru .....	28
3.6.2 Pomocí mikrofonu .....	28
3.7 Měření akustické emise .....	28
4. Návrh systémů měření fyzikálních veličin procesu broušení	
včetně návrhů metodiky experimentů pro navrhované systémy .....	29
4.1 Bruska BPH 320A .....	29
4.1.1 SBS Balance System model SB-4500 .....	30
4.2 Optický snímač BMT OS041 .....	30
4.3 Indukčnostní snímač SPIRO .....	31
4.4 Indukčnostní snímač vzdálenosti BAW M08EI-UAD15B-BP03 .....	32
4.5 Piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B .....	32
4.6 Labview a měřicí karta PCI-6023E .....	34
4.7 Navrhovaná metodika experimentu .....	34
5. Experimentální část .....	36
5.1 Použité broušící nástroje a obráběný materiál .....	36
5.2 Příprava kotouče před měřením .....	37
5.3 Příprava dynamometru Kistler před měřením .....	37
5.4 Příprava ostatních snímačů a zařízení před měřením .....	38
5.5 Kalibrace .....	39
5.6 Popis měření .....	40
5.7 Zpracování výsledků měření a jejich vyhodnocení .....	41
5.7.1 Broušící kotouč číslo 1 .....	41
5.7.2 Broušící kotouč číslo 2 .....	50
6. Závěr .....	52
Seznam použité literatury .....	54
Seznam příloh .....	56

## Seznam použitých značek a zkratek

Označení	Jednotka	Popis
$a_e$	[ $\mu\text{m}$ ]	nastavená hloubka radiálního záběru
$a_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	pracovní radiální záběr
$d$	[mm]	průměr obrobku
$D$	[mm]	průměr kotouče
$F$	[N]	celková řezná síla
$F_c$	[N]	posuvová složka řezné síly
$F_{cN}$	[N]	radiální složka řezné síly
$F_x, F_y, F_z$	[N]	složky řezné síly
$g, g_v$	[-]	brusný poměr
$G_m$	[g]	hmotnost odebraného materiálu
$G_z$	[g]	hmotnost spotřebovaného zrna
$h$	[ $\mu\text{m}$ ]	úbytek obrobku
$H$	[mm]	šířka kotouče
$l$	[mm]	délka obrobku
$n_k$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky brusného kotouče
$n_{ob}$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky obrobku
$p$	[MPa]	tlak
$q, q_v$	[-]	měrná spotřeba zrna
$Q_a$	[mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	úběr určený spotřebou brusného nástroje
$Q_c$	[J]	celkové vzniklé teplo při broušení
$Q_{ch}$	[J]	teplo odebírané procesní kapalinou
$Q_k$	[J]	teplo přestupující do kotouče
$Q_m$	[mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	úběr určený objemem odebraného materiálu
$Q_o$	[J]	teplo přecházející do obrobku
$Q_t$	[J]	teplo odcházející s třískami
$Q_v$	[J]	teplo vyzářené
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	drsnost povrchu
$s$	[mm]	šířka obrobku
$T$	[min]	trvanlivost kotouče
$v_c$	[mm <sup>3</sup> ]	obvodová rychlost kotouče



$v_f$	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost
$\Theta_{\text{ok}}$	$[^{\circ}\text{C}]$	okamžitá teplota broušení

## 1. Úvod

Prvními lidmi, kteří ovládli technologii broušení mohli být australští Aboriginci. Svědčí o tom nedávný nález úlomku sekery nalezené archeology v severní Austrálii. Ta byla opracována broušením pískem před více než 35 000 lety [1]. Prudký rozvoj technologie broušení nastal začátkem minulého století, kdy se stupňovaly požadavky na vysokou přesnost součástí, dovolující jejich vzájemnou vyměnitelnost. Díky dosahovaným vysokým kvalitativním parametrům obrobené plochy našlo broušení v moderní výrobě široké uplatnění. V dnešní době, kdy je snaha výrobní procesy co nejvíce automatizovat, je stále větší potřeba proces broušení přesně charakterizovat. To je velmi komplikované, protože brousící nástroj se od běžných způsobů obrábění liší jistými zvláštnostmi a proto nebyl proces broušení dodnes zcela popsán.

Právě jedním z cílů této práce je návrh a sledování rozhodujících fyzikálních veličin procesu broušení. Ty musí být možno měřit a vyhodnocovat přímo v průběhu obrábění. Způsoby měření navrhovaných veličin mají být popsány pouze při zápichovém rovinném broušení obvodem kotouče bez použití procesní kapaliny a s ohledem na vybavení Katedry obrábění a montáže (dále jen KOM). Z tohoto důvodu se práce jinými způsoby broušení zabývat nebude.

Řešením problému je určení optimálních zařízení měřících vybrané fyzikální veličiny procesu broušení a jejich správné umístění. Poukázat na klady zvoleného systému a případně upozornit na úpravy, které je třeba provést tam, kde navrhovaný systém zklamal.

V teoretické části práce je v nezbytně nutném rozsahu pojednáno o procesu broušení a o zvláštnostech brousícího nástroje. Také je zde poukázáno na fyzikální veličiny, které v procesu broušení hrají nejdůležitější roli.

V následující části jsou pak zmíněny možnosti způsobu měření rozhodujících fyzikálních veličin s přihlédnutím k tomu, aby zařízení byla schopna měřit v průběhu pracovního cyklu a s ohledem na vybavení laboratoře KOM.

Další část vychází z předchozích kapitol a bude v ní učiněn návrh na systém měření fyzikálních veličin. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce se bude zabývat jen vybranými fyzikálními veličinami. Také zde budou jednotlivá zařízení popsána a bude učiněn návrh metodiky měření pro navrhované systémy.

Experimentální část je věnována samotné instalaci měřicí aparatury a následnému ověření její funkčnosti. Je zde uveden průběh experimentu a naměřené veličiny zpracované do grafů. Výsledky jsou doprovázeny komentářem.

V závěru je pak celkové zhodnocení navrhované měřicí aparatury a metodiky experimentu a jsou uvedeny návrhy na zlepšení ověřeného měřicího systému.

## 2. Teoretická část

Cílem této bakalářské práce je návrh měření rozhodujících fyzikálních veličin procesu broušení na brusce BPH 320A. Proto je vhodné charakterizovat proces broušení. V následující části je v nezbytném rozsahu pojednáno o procesu broušení, o parametrech brusného nástroje a o fyzikálních jevech doprovázejících proces broušení opírající se o odbornou literaturu.

### 2.1 Broušení

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění. Tyto metody třískového obrábění jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovatelnou geometrií břitu. Pro broušení se užívá mnohobřítý nástroj vytvořený ze zrn brusiva, která jsou spojena pojivem [2, 3].

Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporný. Brousicí proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech ( $30$  až  $100 \text{ m.s}^{-1}$ ) a při malých průřezech třísky ( $10^{-3}$  až  $10^{-5} \text{ mm}^2$ ) [2].

Broušení se používá zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů a tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit (např. u kalených ocelí, žárupevných materiálů), nebo je brousicí metoda hospodárnější než jiné. S rozvojem výkonných brousicích nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění [2, 3].

#### 2.1.1 Tvoření třísky při broušení

Při vázaném zrně brusiva lze charakterizovat vznik třísky obdobně jako při frézování. Při mikroskopickém sledování třísek při broušení plastických materiálů je vidět, že vzniká tříska plynulá, která se v podstatě neliší od třísky vytvořené záběrem jiných nástrojů s kovovým břitem. Určitá část třísek, která byla odebrána břity se zvlášť nevhodnou geometrií, se v důsledku velkých plastických deformací a tření (vnějšího i vnitřního) ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky, nebo dokonce shoří (jiskření) [4].

### 2.1.2 Druhy broušení

Z hlediska tvaru broušené plochy a způsobu práce můžeme broušení rozdělit [5]:

- 1) broušení do kulata:
  - a) vnějších ploch:
    - axiálním (podélným) způsobem malými úběry, nebo hloubkově,
    - zapichovacím způsobem,
    - bezhrotovým způsobem průběžně, nebo zapichováním,
  - b) vnitřních ploch:
    - axiálním (podélným) způsobem,
    - zapichovacím způsobem,
    - planetovým způsobem,
    - bezhrotovým způsobem,
- 2) broušení rovinných ploch:
  - obvodem brousicího kotouče,
  - čelem brousicího kotouče,
- 3) broušení tvarových ploch:
  - tvarovými kotouči,
  - kopírovacím způsobem,
  - na NC a CNC brousicích centrech.

### 2.1.3 Brousicí nástroje

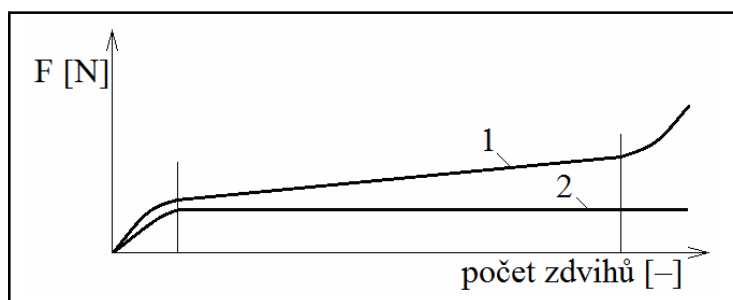
Brousicí materiál tvoří zrna brusiva pevně vázaná v tuhých či pružných tělesech různých velikostí a tvarů, jako jsou brousicí, řezací a drážkovací kotouče, brousicí tělíška, superfinišovací a honovací kameny, brousicí a obtahovací kameny a segmenty, brousicí pilníky, nebo jsou nanesena a zakotvena na brousicích a leštících plátnech či papírech. Jen pro některé speciální případy broušení a dokončovací (lapování) se používá tzv. volného brusiva ve formě brousicích a leštících past a prášků [4].

Největší rozsah výroby a použití představují brousicí kotouče, jejichž všeobecná charakteristika je dána podle ČSN 22 4501 [4]:

- druhem brousicího materiálu,
- zrnitostí brousicího materiálu,
- tvrdostí,

- strukturou nástroje,
- druhem pojiva,
- rozměry kotouče.

Od jiných způsobů obrábění se práce brousicího kotouče liší schopností tzv. samoostření (obr. 1). Tato vlastnost brousicího kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením brousicího zrna ve vazbě kotouče. Při správně zvolených řezných podmínkách a režimu broušení se otupená zrna z brousicího nástroje vylamují a uvolňují tak místo novým, ostrým zrnům. Jestliže je řezný odpor působící na zrna příliš malý, nebo pevnost pojivových můstků příliš velká, otupená zrna se neuvolní, kotouč špatně řeže a nadměrně zahřívá broušený povrch. V opačném případě se předčasně vylamují ještě dostatečně ostrá zrna brusiva a kotouč se rychle opotřebovává [2, 4].



Obr. 1 Změny řezné síly v procesu broušení [6]

1 – při otupování brousicího kotouče, 2 – s uplatněním efektu samoostření

Charakteristickou zvláštností procesu broušení je vysoké namáhání nástroje – brusného kotouče. Kotouč není zatěžován řeznou silou, která vzhledem k malým průřezům materiálu odebíraného brusným kotoučem je poměrně malá, ale odstředivou silou. Je to limitující síla pro volbu maximálních otáček brusného kotouče [7].

### 2.1.3.1 Brousicí materiály

Brusiva (ostřiva) jsou ostrohranná zrna různé velikosti (hrubá, střední, jemná a velmi jemná), jejichž ostré hrany vystupují v různých výškách nad povrch brousicího nástroje a tím vznikají břity s velmi různou geometrií, zpravidla s úhlem řezu  $\delta > 90^\circ$ . Tato zrna musí být dostatečně tvrdá, aby mohla odřezávat obráběný materiál. Podle původu se brusiva dělí na přírodní a umělá [8].

Přírodní brusiva (pazourek, pískovec, smírek, křemen apod.) mají dnes, kromě přírodního diamantu, malý význam a používají se převážně k výrobě brousicích plátén.

Umělá (syntetická) brusiva se používají výhradně k výrobě brousicích nástrojů. Jsou to [5, 8]:

- umělý korund,
- karbid křemíku,
- karbid boru,
- kubický nitrid boru,
- syntetický diamant,
- oxid hlinitý,
- oxid ceričitý.

### **2.1.3.2 Zrnitost brusiva**

Surové brousicí materiály se drtí a třídí podle zrnitosti na soustavě sít. Zrnitost brusiva se označuje podle ČSN 22 4012. Číslo zrnitosti vyjadřuje měrný rozměr, za který se považuje šířka zrna, přičemž jeho rozměry jsou definovány délkou  $l$  [ $\mu\text{m}$ ], šířkou  $b$  [ $\mu\text{m}$ ] a výškou  $h$  [ $\mu\text{m}$ ] tak, že  $l \geq b \geq h$ , přičemž  $l/h$  nemá u 90% zrn přesahovat hodnotu 5 (nevhodná geometrie zrn). Zrna se šířkou větší než 40  $\mu\text{m}$  se kontrolují proséváním, zrna menší mikroskopicky [3].

Dřívější označování zrnitosti podle ČSN vycházelo ze systému, který až dosud používá většina zahraničních výrobců, kde číslo zrnitosti znamená počet ok síta, vztažené na délku 1 anglického palce, kterým zrno propadlo. Tloušťka drátu síta je rovná  $\frac{1}{4}$  délky oka [4].

Z hlediska řezání je důležitý také tvar zrn brusiva. Nejlepší vlastnosti pro pojené brousicí nástroje mají zrna izometrická, kde  $l \approx b \approx h$ , která jsou pevnější a odolnější vůči rázům než zrna jehlicovitá [4].

Kontrola zrnitosti je předepsána v ČSN 01 5030 [9].

### **2.1.3.3 Tvrdost brousicích nástrojů**

Patří mezi ty vlastnosti brousicího nástroje, která nejvíce ovlivňuje průběh a výsledky procesu broušení. Tato tvrdost nevyjadřuje však skutečnou tvrdost brousicího materiálu, ale je mírou houževnatosti a pružnosti pojivových mŕstvků mezi zrny, jakož i soudržnosti pojiva se zrny. Je definována jako odpor, který klade pojivo brousicího nástroje proti vylomení nebo uvolnění zrn brousicího materiálu. Závisí tedy

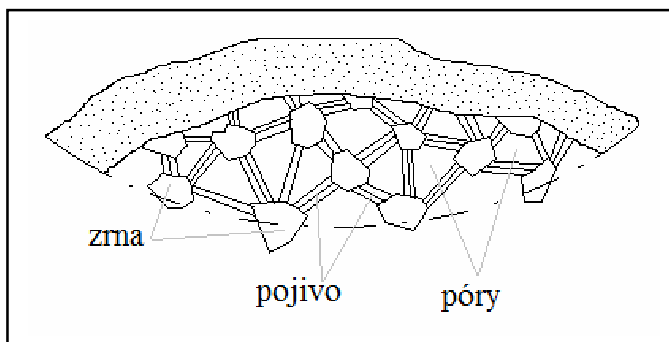
nejen na vlastnostech pojiva, ale i na počtu a velikosti mŕstvkŕ, velikosti, počtu a tvaru zrn [4, 9].

Jestliŕe se uvolŕuje zrna snadno, označujeme kotouč jako mĕkký, v opačném případě jako tvrdý. Tvrdost brousicích kotoučŕ se označuje G až Z podle následující stupnice [3, 4]:

- velmi mĕkké G, H,
- mĕkké I, J, K,
- střední L, M, N, O,
- tvrdé P, Q, R, S,
- velmi tvrdé T, U,
- zvlášť tvrdé V, Z.

#### 2.1.3.4 Struktura brousicích nástrojŕ

Struktura brousicího nástroje je podle obr. 2 tvořena zrna brusiva pevnĕ spojenými pojivovými mŕstky, mezi kterými jsou různĕ velké mezery – póry. Objem nástroje  $V$  [dm<sup>3</sup>] tedy můžeme vyjádřit jako součet objemu zrn  $V_z$ , pojiva  $V_p$  a pŕrŕ  $V_n$  [9].



Obr. 2 Schéma struktury brousicího kotouče [4]

Pro každý konkrétní případ broušení existuje určitý optimální pomĕr těchto složek z hlediska produktivity broušení a nejlepší drsnosti obrobené plochy při nejnižším opotřebení nástroje. Podle ČSN 22 4024 je struktura hodnocena pomĕrem objemu otevřených pŕrŕ k objemu nástroje. Na brousicích kotoučích se označuje číselným údajem od 1 (velmi hutná struktura) do 13ti (zvlášť pórovitá struktura) [3, 9].



### 2.1.3.5 Pojiva brousicích nástrojů

Zrna brusiva jsou vázána pojivy tak, aby kotouče měly požadované tvary, rozměry a vlastnosti, které si zachovají i v procesu broušení za vysokých teplot a tlaků. Druh pojiva určuje zejména pevnost kotouče a tím i jeho dovolenou obvodovou rychlost. Základní pojiva tvoří anorganická pojiva – keramická, magnezitová, silikátová, příp. kovová a pojiva organická – umělé pryskyřice, guma, šelak [3].

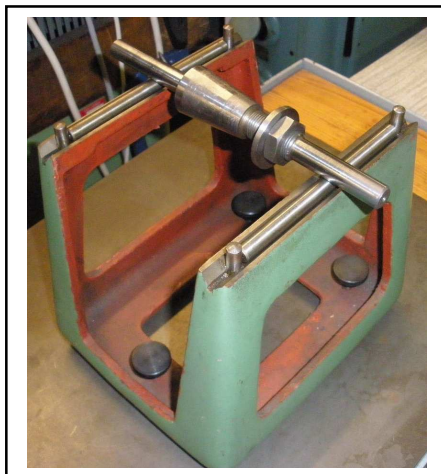
Keramické pojivo je nejrozšířenějším pojivem a pokrývá asi 80% výroby brousicích nástrojů. Lze jím pojít umělý korund i karbid křemíku a splňuje dobře požadavek dobrého uložení zrn. Nevýhodou je jejich menší pevnost v tahu, která nedovoluje překročit obvodové rychlosti kotoučů více než  $60 \text{ m.s}^{-1}$  [3].

Tab. 1 Pojiva brousicích nástrojů [8]

Pojivo	Označení
Keramické	V
Silikátové	S
Pryžové	R
Umělá pryskyřice	B
Šelakové	E
Magnezitové	Mg
Polyuretanové	U
Kožní klíh	G

### 2.1.4 Vyvažování brousicích kotoučů

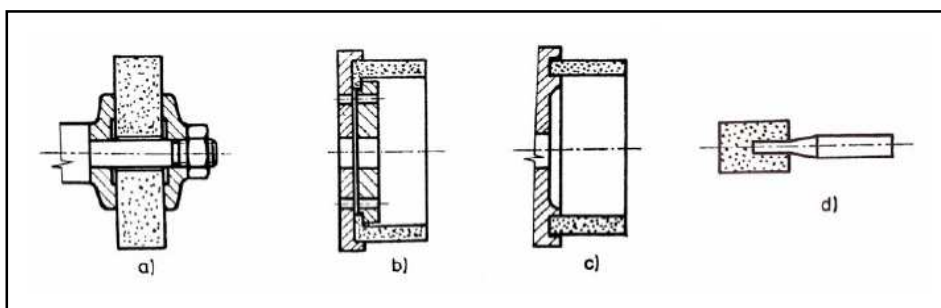
Odstředivé síly nevyváženého kotouče jsou zdrojem vynucených kmitů, které mají za následek zhoršení jakosti broušené plochy. Statické vyvažování brousicího kotouče se provádí na vyvažovacím stojánku přestavováním vyvažovacích tělísek v drážkách upínacích přírub tak, aby se kotouč upnutý na přesném trnu rovnoměrně odvaloval na tzv. vyvažovacím kozlíku (obr. 3). Pro přesné broušení a obvodové rychlosti větší než  $50 \text{ m.s}^{-1}$  je nutno brousicí kotouče o šířce větší než 30 mm vyvažovat dynamicky na speciálním vyvažovacím zařízení, kdy se eliminuje také vliv momentových dvojic nevyvážených hmot. Některé brusky jsou dodávány s přídatným zařízením, kterým lze vyvážit kotouče za chodu brusky přímo na vřetenu automaticky nebo poloautomaticky [2, 4].



Obr. 3 Vyvažovací stojánek a přesný trn

### 2.1.5 Upínání brousicích kotoučů

Brousicí kotouče se na vřeteno brusky upínají pomocí přírub, nejčastěji mechanickým sevřením (obr. 4 a, b) nebo lepením speciálními tmely (obr. 4 c, d). Průměr obou přírub musí být stejný a roven nejméně  $\frac{1}{3}$  průměru brousicího kotouče. Mezi příruby a kotouč se vkládají z obou stran pružné podložky z pryže, kůže nebo papíru [4].

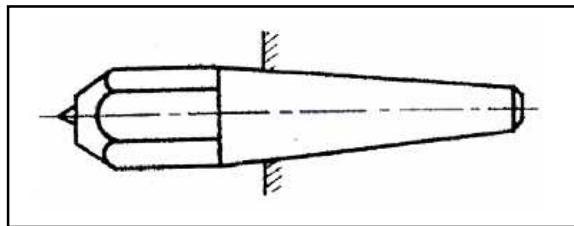


Obr. 4 Možnosti upínání brousicích kotoučů [4]

### 2.1.6 Orovňávání brousicích kotoučů

Účelem orovňávání je vytvoření nebo obnovení požadovaného tvaru kotouče a obnovení struktury funkční plochy kotouče s původní řezivostí odstraněním otupených zrn brousicího materiálu a zbytků odbroušeného materiálu [4].

Nejrozšířenější jsou orovnávače diamantové. Používají se jednokrystalové (obr. 5), vícekrystalové, práškové a jako diamantové kladky pro produktivní tvarování kotoučů ve velkosériové a hromadné výrobě [4].



Obr. 5 Jednokrystalový orovnávač brousicích kotoučů [4]

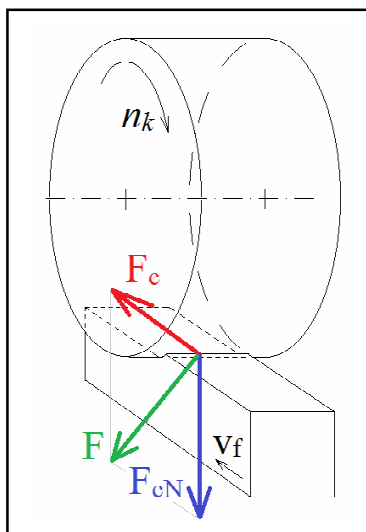
### 2.1.7 Řezné síly při broušení

Řezné síly se dají určit buď měřením či přibližně výpočtem. Při broušení totiž nelze vypočítat velikost působících sil se stejnou přesností jako při obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu. Velikost řezných sil při broušení závisí nejen na způsobu broušení a na nastavených řezných podmínkách (průřezu třísky), ale i na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře kotouče. Závisí také výrazně na způsobu orovnění a okamžitém stavu funkční plochy kotouče. Při opotřebení kotouče může vzrůst řezná síla až o několik set procent [9, 10].

Celková řezná síla  $F$  [N] působící v obecném směru mezi brousicím kotoučem a obrobkem se rozkládá do tří vzájemně kolmých složek. V případě zkoumaného zápichového rovinného broušení obvodem kotouče se celková řezná síla  $F$  (obr. 6) rozkládá pouze do dvou směrů:

- posuvová řezná síla (tangenciální složka)  $F_c$  [N] je složka ve směru řezné rychlosti,
- radiální řezná síla (normálová složka)  $F_{cN}$  [N] je složka kolmá k broušené ploše.

Při broušení platí, že  $F_{cN} > F_c$  a  $F_{cN}/F_c = 1,2 \div 3$  [2].



Obr. 6 Rozložení řezných sil při zápichovém rovinném broušení obvodem kotouče

### 2.1.8 Tepelné jevy při broušení

V procesu mikrořezání se vytváří v povrchové vrstvě obrobku při broušení velký počet míst s vysokými teplotami, jejichž působením se povrchová vrstva intenzivně zahřívá.

Tepelný proces v povrchové vrstvě obrobku se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, krátkou prodlevou na této teplotě a rychlým ochlazením (zvláště při použití procesní kapaliny).

Vzniklé teplo přechází do obrobku, kotouče, třísky a procesní kapaliny [6].

$$Q_c = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} + Q_v \quad [J] \quad (1)$$

kde:

- $Q_c$  celkové vzniklé teplo při broušení,
- $Q_o$  teplo přecházející do obrobku,
- $Q_k$  teplo přestupující do kotouče,
- $Q_t$  teplo odcházející s třískami,
- $Q_{ch}$  teplo odebírané procesní kapalinou,
- $Q_v$  teplo vyzáření.

Největší množství tepla (až 80%) přechází při broušení do obrobku, nejmenší část tepla se ztrácí vyzařováním do okolního prostředí.

Vysoké teploty broušení mohou způsobit defekty povrchové vrstvy obrobku (opal nebo trhlinky) a obrobek se znehodnotí. Proto se tepelný vliv stává jedním ze základních činitelů broušení [6].

Vznik a rozdělení tepla při broušení ovlivňuje typ kotouče, řezné podmínky, mechanické a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu, vlastnosti procesní kapaliny. Teplotu při broušení lze snížit zmenšením intenzity působení zdrojů tepla a jeho intenzivnějším odváděním [11].

## 2.2 Hodnocení procesu broušení

Na proces broušení má vliv mnoho faktorů. V obecném případě, když označíme zkoumanou veličinu písmenem  $A$  ( $T$  – trvanlivost kotouče,  $F$  – řezná síla,  $R_a$  – drsnost povrchu broušené plochy,  $\Theta_{ok}^\circ$  – okamžitá teplota broušení), dostaneme:

$A=f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, l, d, D, H, n_k, n_{ob}, h, s, C_6, C_7, C_8)$ , kde  $C_1$  až  $C_8$  jsou součinitele charakterizující postupně obráběný materiál, druh brusiva, pojivo, tvrdost a strukturu kotouče, řeznou kapalinu, přesnost a tuhost brusky, kvalitu orovnění broušícího kotouče [6].

K hodnocení efektivnosti procesu broušení a kvality (pracovních schopností) broušících nástrojů se užívají různé ukazatele [6]:

- úběr určený objemem odebraného materiálu,  $Q_m$  [mm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>],
- opotřebení nástroje (brusiva), určené jeho spotřebou,  $Q_a$  [mm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>],
- brusný poměr  $q=Q_m/Q_a$  [-],
- trvanlivost nástroje  $T$  [min],
- drsnost obrobené plochy  $R_a$  [μm].

Při podnikové kontrole jakosti broušících kotoučů stačí určit (prověřit) pouze základní ukazatele účinnosti procesu, tj. produktivitu broušení, opotřebení kotouče, brusný poměr, trvanlivost kotouče a drsnost broušeného povrchu.

### 2.2.1 Brusný poměr

Brusný poměr broušení se určuje množstvím odebraného materiálu, které připadá na jednotku hmotnosti spotřebovaného zrna. Vyjadřuje se v jednotkách hmotnosti odebraného materiálu  $g$  nebo v jednotkách objemu  $g_v$  [6]:

$$g=G_m/G_z \text{ nebo } g_v=Q_m/G_z \quad (2)$$

kde:

$G_m, Q_m$  hmotnost, objem odebraného materiálu,

$G_z$  hmotnost spotřebovaného zrna (diamantového nebo kubického nitridu bóru).

K určení normy spotřeby nástroje se užívá měrné spotřeby zrna, což je množství zrna potřebné k odebrání objemové  $q_v$  nebo hmotnostní jednotky materiálu  $q$ , tj. reciproká hodnota brusného poměru [6]:

$$q=G_z/G_m \text{ nebo } q_v=G_z/Q_m \quad (3)$$

Brusný poměr broušení a měrná spotřeba zrna jsou důležité ukazatele účinnosti procesu broušení, i když plně nevystihují pracovní podmínky obrábění. Proto se často používají taková kritéria jako je trvanlivost nástroje, drsnost obrobené plochy a řada doplňujících měřítek, např. teplota broušení, velikost řezné síly [6].

## 2.3 Trvanlivost nástroje při broušení

Trvanlivost nástroje se dá určovat přímo jeho spotřebou (kapitola 2.2.1) a sledováním povrchu nástroje. Takové metody, které by však umožňovaly sledovat stav povrchu brusného kotouče přímo v průběhu procesu broušení jsou velmi komplikované a tudíž nákladné (např. metoda optická na základě odrazu světla) a přesto neumožňují sledovat vliv na výsledný broušící proces. Nepřímé metody určování opotřebení nástroje se zakládají na jevech, které opotřebení řezného nástroje doprovázejí. Sledování těchto jevů je snazší a s výhodou se užívají.

Při opotřebení nástroje dochází ke zvýšení řezné síly, tudíž ke zvýšení výkonu obrábění. V souvislosti s tím dochází ke zvýšení teploty v obrobku i nástroji. Především však dochází ke zmenšení úbytku obrobku a zhoršení kvality obráběné plochy. Proto je vhodné sledovat [12]:

- vzrůst složek řezné síly (kapitola 3.4),
- zvýšení výkonu obrábění,
- zvýšení teploty (řezání) v oblasti kořene třísky (kapitola 3.5),
- vznik chvění, doprovázený slyšitelným zvukem (kapitola 3.6),
- emise signálů v pásmu ultrazvuku, tzv. akustická emise (kapitola 3.7),
- změna rozměrů obrobku (kapitola 3.2),
- zhoršení drsnosti povrchu.

### 3. Způsoby měření rozhodujících fyzikálních veličin procesu broušení na brusce BPH 320A

Tato kapitola bude věnována způsobům měření rozhodujících fyzikálních veličin vystupujících v procesu broušení, na které bylo upozorněno v předchozí kapitole. Bude navrženo jakým způsobem by bylo dobré navrhované veličiny měřit. Rovněž budou zmíněna zařízení, která by taková měření umožnila, dle požadavku zadání, přímo během pracovního procesu. Uvedená měřicí zařízení jsou vybrána s ohledem na vybavení laboratoře KOM, aby bylo možné uskutečnit následný experiment. Experiment bude prováděn na rovinné brusce BPH 320A (technologie rovinného broušení).

#### 3.1 Rovinné broušení

Rovinné broušení se zpravidla používá jako operace na čisto po předcházejícím frézování nebo hoblování, často se však používá i místo frézování při obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou. Na vodorovné ose brousicího vřetena se otáčí brousicí kotouč obvodovou rychlostí  $v_c$  a obrobek, který je upnut na elektromagnetickou desku umístěnou na pracovním stole, vykonává podélný vratný pohyb posuvovou rychlostí  $v_f$  [2].

#### 3.2 Určení odebraného materiálu

Hodnota tloušťky odbrušované vrstvy nastavené na brusce  $a_e$  není rovna skutečné tloušťce odebrané vrstvy, tedy velikosti pracovního radiálního záběru  $a_p$ . To je způsobené vlivem působení řezných sil v soustavě S–N–O–P (stroj–nástroj–obrobek–přístroj), které vedou ke vzniku deformací. Nejlepší volbou pro určení odebraného materiálu se tedy jeví měření úbytku obrobku. Tato veličina je pak skutečnou velikostí radiálního záběru.

K měření úbytku obrobku se na KOM využíval bezdotkový pneumatický snímač, dotkový tenzometrický snímač a nejvíce se pro svou jednoduchost osvědčil indukční snímač. Tyto snímače pracují na rozdílných fyzikálních principech a budou dále popsány.

### **3.2.1 Měření úbytku pomocí pneumatického snímače**

Bezdotkový pneumatický snímač je popsán v literatuře [13]. Nevýhodou bezdotkových pneumatických snímačů je prostorová náročnost a kalibrační závislost, která není v celé délce lineární a snižuje tak rozsah snímačů. Další nevýhodou je potřeba zdroje stlačeného vzduchu se stabilním konstantním tlakem [14].

### **3.2.2 Měření úbytku pomocí tenzometru**

Obrobek je v dotyku s nosníkem snímače, na němž jsou přilepeny tenzometry. Na počátku měření se vytvoří předpětí mezi obrobkem a nosníkem, tím dojde k deformaci nosníku. V průběhu broušení, kdy dochází k úbytku obrobku, se tato deformace nosníku zmenšuje a je snímána tenzometry. Právě problematické připevnění tenzometrů na nosník snímače tvoří hlavní nevýhodu. Oproti tomu je konstrukce snímače jinak jednoduchá [14].

### **3.2.3 Měření úbytku pomocí indukčního snímače**

V indukčních snímačích se měřená veličina převádí na změnu indukčnosti. Nevýhodou indukčních snímačů je potřeba kalibrace. Výhodou je snadná instalace. V kapitole 4.4 bude tento snímač podrobněji popsán, jelikož byl pro svou nenáročnost využit v experimentální části.

## **3.3 Opotřebení nástroje určené jeho spotřebou**

Zjišťování úbytku kotouče je nezbytné pro určení efektivnosti procesu broušení, ale tyto metody již nevypovídají o rezném stavu kotouče. Na KOM bylo v minulosti vyzkoušeno několik metod uvedených dále. Pro vyhodnocení úbytku kotouče existují i jednodušší metody, ale těmi se tato bakalářská práce zabývat nebude, protože je nelze použít k měření přímo v průběhu procesu broušení (např. metoda váhová, žiletková).



### 3.3.1 Metoda s použitím mikrovln

Tato metoda používá mikrovlny v rozmezí od 3 GHz do 300 GHz. Protože k měření úbytku brousicího kotouče může docházet v průběhu pracovního cyklu, jeví se tato metoda jako perspektivní, ale není ještě zcela vyvinuta a ověřena [14].

### 3.3.2 Metoda s použitím bezdotykového pneumatického snímače

Z řady experimentů uskutečněných na KOM byl jako nejvýhodnější průměr trysky určen průměr  $d=1,5$  mm při napájecím tlaku  $p_1=0,3$  MPa. Výchozí vzdálenost mezi povrchem brousicího kotouče a tryskou byla stanovena z kalibrační závislosti a činí 0,05 mm. Nevýhodou jsou problémy spojené s aerodynamikou kolem rotujícího brusného kotouče a vysoké nároky na prostor [14].

## 3.4 Měření řezné síly nebo krouťícího momentu

Měření řezné síly a krouťícího momentu bylo jednou z prvních veličin používaných k měření opotřebení nástroje, protože s opotřebením nástroje obvykle roste řezný odpor. Řeznou sílu, resp. její složky můžeme měřit dvěma způsoby [10]:

- nepřímým měřením sil, při kterém měříme příkon, nebo krouťící moment na vřetení a z něho řeznou sílu vypočítáme,
- přímým měřením dynamometry.

V této bakalářské práci bude pojednáno pouze o metodách přímého měření řezných sil, kterými se bude zabývat v experimentální části.

### 3.4.1 Přímé měření řezných sil

Pro přímé měření řezných sil lze používat dynamometrů, umožňujících měřit jednu, dvě, nebo tři složky řezné síly, případně krouťící moment. Základní součástí dynamometru je pružný element, který se deformuje působením měřené síly. Deformaci tohoto elementu měříme snímačem a převádíme na jinou veličinu, kterou jsme schopni měřit nebo registrovat. Zpracování signálu ze snímače se provádí v měřicí aparatuře [10].

Dynamometr jako měřicí zařízení musí splňovat určité požadavky zejména: tuhost, vysokou vlastní frekvenci, přesnost měření, dostatečnou citlivost a rozsah,

časovou stálost cejchování, minimální závislost na parazitních vlivech (teplota, vlhkost), minimální ovlivňování složek síly navzájem a spolehlivost [10].

Podle toho na jakou veličinu převádí snímač měřenou sílu lze dynamometry rozdělit na mechanické, hydraulické, pneumatické a elektrické [10].

Nejčastější dynamometry pro měření řezných sil jsou dynamometry elektrické. Síla se podle různých fyzikálních principů mění na elektrickou veličinu, jejíž měření je poměrně snadné a dobře zpracovatelné i výpočetní technikou. Podle druhu použitého snímače se dělí elektrické dynamometry na [10]:

- odporové (nejčastěji tenzometrické),
- piezoelektrické,
- indukčnostní,
- kapacitní,
- ostatní (magnetoelastické, magnetostrikční apod.).

Výhodou elektrických dynamometrů je zejména vysoká citlivost, přesnost, snadná registrace síly a schopnost dynamického měření sil. Z uvedených typů se v obrábění používají pro konstrukci dynamometrů nejčastěji tenzometrické a piezoelektrické snímače. Právě tyto dvě metody již byly na KOM v řadě experimentů využity.

#### ***3.4.1.1 Metoda s použitím tenzometrického dynamometru***

Tenzometrický dynamometr určený pro broušení byl v minulosti vyroben na KOM a je popsán v literatuře [14]. Snímání řezných sil pomocí tenzometrického dynamometru je založeno na deformaci členů dynamometru, na kterých jsou přilepeny tenzometrické snímače. Svým principem je tento dynamometr jednoduchý. Problémem je kvalita a spolehlivost nalepených tenzometrických snímačů a potřeba kalibrace dynamometru před měřením [14].

#### ***3.4.1.2 Metoda s použitím piezoelektrického dynamometru***

Piezoelektrické snímače síly jsou založeny na piezoelektrickém jevu, který spočívá ve vlastnostech některých krystalických dielektrik. Na nich vzniká vlivem deformace elektrická polarizace a tím elektrický náboj. Vzniklý náboj je měřen a z něho se pak určí řezné síly. Jakmile mechanické napětí zmizí, dostává se dielektrikum

do původního stavu [10]. KOM je vlastníkem takového dynamometru od firmy Kistler, který je blíže popsán v kapitole 4.5.

### 3.5 Měření teploty v oblasti řezání pro broušení

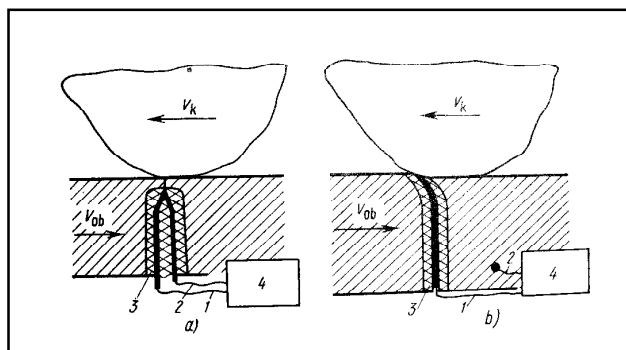
O tepelných jevech bylo pojednáno v kapitole 2.1.8. Teplotu řezání také ovlivňuje velikost opotřebení řezného nástroje, především proto byly vyvíjeny metody pro její měření.

#### 3.5.1 Přirozený termočlánek

Termoelektrická síla vzniká na kontaktu obráběného a řezného materiálu. Je nutno provést kalibraci před každým obráběním, jelikož naměřené hodnoty jsou velmi ovlivňovány vlastnostmi materiálů, které jsou v kontaktu. Další nevýhodou je nutnost odizolovat nástroj a obrobek navzájem. Dále získaný signál je silně ovlivněn tvorbou třísky. Výhodou dané metody je její pohotovost, relativní jednoduchost a nenáročnost [6, 13].

#### 3.5.2 Umělý termočlánek

Umělý termočlánek se vyrábí spojením dvou drátů, které dávají dostatečně velkou termoelektrickou sílu. Termočlánek se umísťuje v blízkosti špičky řezného ostří. Pro nedostatek citlivosti není tato metoda dostatečně vhodná [6, 13].



Obr. 7 Termočláanky: a) umělý b) poloumělý [6]

1,2 – přívody, 3 – elektrická izolace, 4 – elektrický měřicí přístroj

### **3.6 Měření zvuku**

Proces broušení je doprovázen zřetelnými zvukovými jevy. Tyto jevy jsou dokonce proměnlivé s otupením řezného nástroje. Zkušený obráběč pozná již dle sluchu, že obráběcí nástroj není dostatečně ostrý. Proto by bylo dobré měřit zvuk pomocí některé z uvedených metod.

#### **3.6.1 Pomocí akcelerometru**

Akcelerometr umístěný v blízkosti držáku nástroje snímá zvukové vibrace od tření hřbetu nástroje. Získané frekvence jsou rozděleny na nízké a vysoké a jejich poměr poskytuje informaci o opotřebení nástroje [12].

#### **3.6.2 Pomocí mikrofону**

Zvuky z řezání jsou sbírány pomocí mikrofónu a analyzovány metodou spektrální analýzy. Na spektru se s růstem opotřebení začnou objevovat nárůstky amplitud na některých frekvencích [12].

### **3.7 Měření akustické emise**

Při této metodě jsou registrovány a vyhodnocovány ultrazvukové povrchové napěťové vlny, které nesou informaci o procesech probíhajících v kořeni třísky. Signál akustické emise je dostatečně citlivý k opotřebení řezného nástroje a umožňuje rozeznat stav řezného nástroje před a po jeho opotřebení. Jednou z výhod této metody je snadné umístění snímače. Nevýhodou je složité vyhodnocení naměřených signálů [12].

## 4. Návrh systémů měření fyzikálních veličin procesu broušení včetně návrhů metodiky experimentů pro navrhované systémy

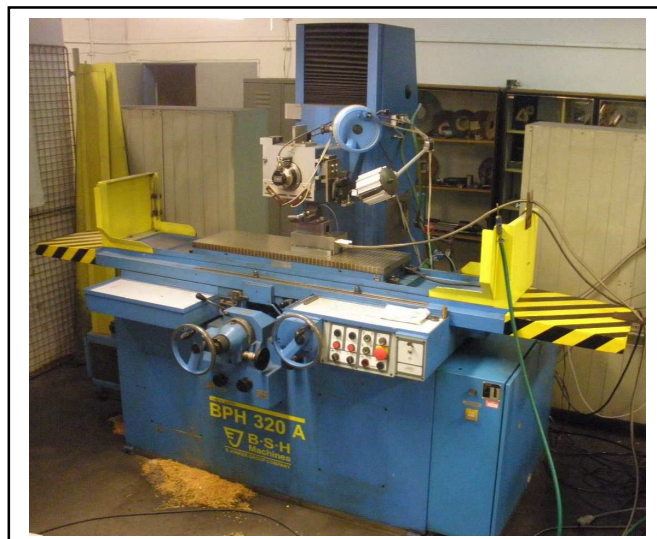
Návrh systému měření fyzikálních veličin vychází z předcházejících kapitol. Vzhledem k výše uvedenému, rozsahu bakalářské práce a vybavení laboratoře KOM se navrhuje měřit otáčky brusného kotouče  $n_k$ , velikost posuvové rychlosti  $v_f$ , úbytek obrobku  $h$  a složky řezné síly  $F_{cN}$  a  $F_c$ . V této části budou podrobněji popsána navrhovaná měřicí zařízení pro snímání těchto fyzikálních veličin, které byly pro své vlastnosti vybrány jako nejperspektivnější. V závěru této kapitoly bude uveden návrh metodiky experimentů pro ověření navrhovaného systému.

### 4.1 Bruska BPH 320A

Měření procesu broušení bylo provedeno na brusce BPH 320A (obr. 8).

Hlavní technické parametry brusky [11]:

▪ upínací plocha stolu	320 x 1000	[mm],
▪ podélný pohyb stolu	1060	[mm],
▪ maximální délka broušení	1000	[mm],
▪ maximální výška broušení	350	[mm],
▪ vzdálenost osy vřetene od plochy stolu	75 až 475	[mm],
▪ brousicí kotouč (vnější průměr x šířka x průměr díry),	250 x 32 x 76	[mm]
▪ průměr brousicího kotouče po opotřebení	130	[mm],
▪ celková výška stroje	2125	[mm],
▪ otáčky brousicího kotouče Ø 250 mm	2522	[min <sup>-1</sup> ],
▪ otáčky brousicího kotouče Ø 198 mm	3319	[min <sup>-1</sup> ],
▪ hmotnost stroje se standardním vybavením	3345	[kg],
▪ celkový maximální příkon stroje	15,4	[kVA],
▪ max. hladina hluku v místě obsluhy	75	[dB <sub>A</sub> ].



*Obr. 8 Bruska BPH 320A*

#### 4.1.1 SBS Balance System model SB-4500

Pomocí tohoto zařízení (obr. 9) je kotouč dynamicky vyvažován přímo na vřetení brusky za chodu.



*Obr. 9 Systém na dynamické vyvažování*

#### 4.2 Optický snímač BMT OS041

Toto zařízení bylo použito pro měření otáček brouscího kotouče. Optický snímač byl na brusce již nainstalován – otáčky snímá z vřetena brusky. Toto umístění a funkčnost zařízení se již osvědčilo v řadě experimentů.

Snímač je opatřen infradiodou jako zdroje světla a fototranzistorem, který světlo přijímá. Měřený rotující objekt je osazen reflexní ploškou na neodrazivém povrchu.

Vyzářený paprsek se po odrazu od této plošky vrátí zpět na fototranzistor. Vzniklé napěťové impulsy odchází do měřiče frekvence MT 62 F, vyrobeného firmou Meret, s.r.o. Praha. Přístroj měří okamžitou frekvenci otáček a zobrazuje jí na 6-ti místném displeji a zároveň produkuje analogový napěťový signál v rozsahu 0 až 2 V odpovídající velikosti měřených otáček [15].

### 4.3 Indukčnostní snímač SPIRO

Pro měření tangenciální rychlosti posuvu stolu  $v_f$  byl zvolen indukčnostní snímač SPIRO s příslušenstvím od firmy LIMAT Praha. I u tohoto snímače byla řadou experimentů ověřena jeho spolehlivost a tak byl v minulosti snímač na brusku umístěn trvale, tudíž i u tohoto snímače nebyla nutná jeho instalace.

Indukčnostní lineární měřítka (snímače) SPIRO svojí funkcí představují lineární resolvery (lineárnímu posunutí o 2 mm odpovídá 360 elektrických stupňů). Měřítka má pasivní (není napájena elektrickým napětím) měřicí tyč ve tvaru nemagnetické trubky o průměru 12 mm, po níž se posouvá jezdec. Měřicí tyč obsahuje feromagnetickou spirálu se stoupáním 2 mm. Jezdec obsahuje navíc jedno budicí vinutí, tj. obsahuje dohromady 3 vinutí. Z budicího vinutí se do dvou snímacích vinutí indukují střídavá napětí, jejichž amplituda se vlivem změn magnetického odporu, způsobeného spirálou v tyči, mění při posouvání jezdce po tyči. Výstupní signály se zesilují v předzesilovači.

Signál vyhodnocuje indikátor AXICA-MF, který obsahuje převodník s impulsovým výstupem s rozlišením až 0,001 mm [16].

Umístění snímače na rovinné brusce je znázorněno na obr. 10.



*Obr. 10 Umístění snímače SPIRO*

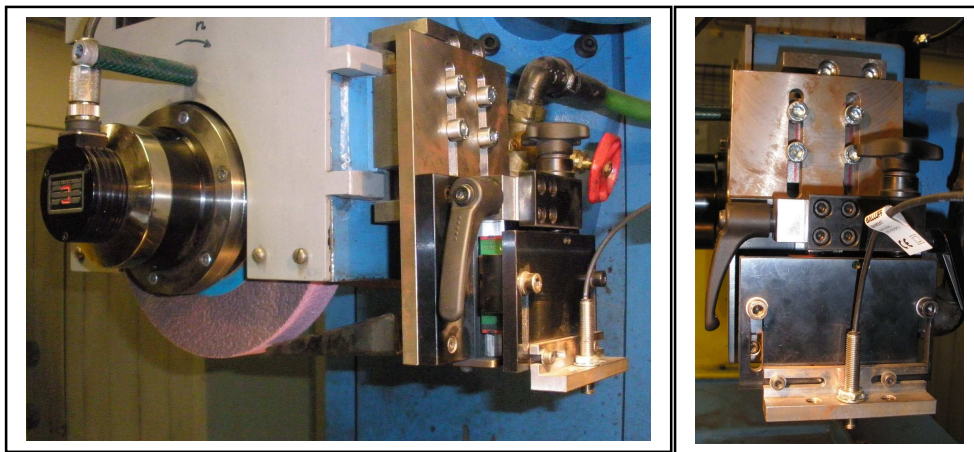
#### 4.4 Indukčnostní snímač vzdálenosti BAW M08EI-UAD15B-BP03

Pro měření úbytku obrobku byl vybrán snímač od firmy Balluw jako nejjednodušší dostupné zařízení na KOM. Snímač je schopen měřit bezdotykově. Jeho předností je snadná instalace, prostorová nenáročnost a neopotřebovatelnost. Nevýhodou zůstává potřeba kalibrace.

Zařízení funguje na principu vzájemného působení mezi kovovými vodiči a střídavým elektromagnetickým polem. V kovovém snímaném tlumícím materiálu jsou indukovány vířivé proudy, které odebírají energii z pole a snižují velikost oscilační amplitudy. Tato změna je indukčním snímačem vyhodnocena.

Zaručená spínací vzdálenost, je vzdálenost, pro kterou je správná funkce snímače zaručena v celém rozsahu dovolených provozních podmínek napájecího napětí a teploty. Pro tento model je minimální pracovní vzdálenost 0,5 mm a maximální pracovní vzdálenost 1,5 mm [16].

Ve vybavení KOM je pouze jeden takový snímač a na obr. 11 je vidět jeho umístění, které se v předchozích experimentech na KOM nejlépe osvědčilo. Imbusovými šrouby je snímač připevněn ke krytu brousicího kotouče na stranu kam neodlétávají třísky z procesu broušení, aby nedošlo k poškození snímače. To však umožňuje měření pouze na dané straně, kde je snímač umístěn.



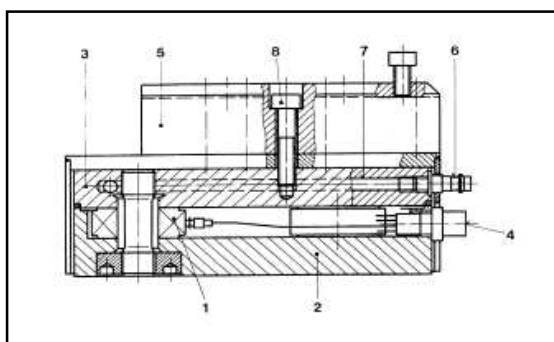
Obr. 11 Indukčnostní snímač vzdálenosti BAW M08EI-UAD15B-BP03

#### 4.5 Piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B

K měření řezných sil byl použit dynamometr Kistler. Zařízení má vysokou citlivost a je jednoduché na instalaci.



Dynamometr KISTLER, který je znázorněn na obr. 12, má vysokou vlastní frekvenci, respektive tuhost. Princip tohoto dynamometru spočívá na vlastnosti krystalů z určitého materiálu (např. uměle připravený křemen  $\text{SiO}_2$ ), které jsou-li namáhány mechanickou silou, vzniká na jejich povrchu náboj. Naopak když je vložíme do elektrického pole tak se deformují (přímý a nepřímý piezoelektrický jev). Obsahuje čtyři piezoelektrické snímače, z nichž každý je složen z piezoelektrických destiček, které jsou uspořádány tak, že každá zachycuje sílu v jiném směru. Dynamometr je konstruován tak, aby se náboje z jednotlivých snímačů sčítaly. Proto nezáleží, na kterém místě upínací části přístroje síla působí, jelikož součet nábojů bude vždy stejný. Dynamometr je schopen měřit staticky i dynamicky [11, 16].



Obr.12 Dynamometr KISTLER typ 9265B [16]

1 – piezoelektrický snímač, 2 – základová deska, 3 – vrchní deska, 4 – konektor, 5 – nožový držák, 6 – vstup pro chladivo, 7 – chladicí systém, 8 – šroub pro upevnění nožového držáku

Pro správnou funkci dynamometru je třeba zajistit předepsané klimatické podmínky v těchto tolerancích:

teplota  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,

vlhkost vzduchu  $42\% \pm 5\%$ .

Kompletní sestava pro měření řezných sil obsahuje nábojový zesilovač 5019 B s ovládacím panelem, na kterém bylo pro broušení nutné nastavit citlivost dynamometru pro obě složky řezné síly, a to dle tab. 2. Z dynamometru vysílaný napěťový signál se zpracovává programem LabVIEW.6 v osobní počítači [11, 16].

Tab. 2 Nastavení citlivosti dynamometru [16]

Síla	Rozsah síly [kN]	Citlivost [pC/N]
$F_c$	0 až 1,5	-7,91
$F_{cN}$	0 až 3	-3,56

## 4.6 Labview a měřicí karta PCI-6023E

Tento program, nainstalovaný do osobního počítače, byl použit pro vyhodnocování měřených veličin. Všechna navrhovaná měřicí zařízení je možno napojit na univerzální měřicí kartu PCI-6023E, pomocí které je program schopen získávat výstupní signály z připojených zařízení. Ke sběru dat tak docházelo přímo v průběhu pracovního cyklu procesu broušení a bylo možné provést jejich vyhodnocení v jednom okamžiku, dle požadavků zadání.

LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench v překladu „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“), od americké firmy National Instruments, je vývojové prostředí vhodné k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů (např. robot). Hlavním cílem je nahradit technické prostředky (hardware) řešením virtuálním pomocí programových (softwarových) prostředků, především graficky a umožnit tak uživateli přehlednost.

Tento software ke své činnosti využívá univerzální měřicí kartu PCI-6023E pro rozšíření sběrnice PCI. Mnohdy je levnější a univerzálnější než jednoúčelový měřicí přístroj [16].

## 4.7 Navrhovaná metodika experimentu

Pro ověření navrhovaného měřicího systému bylo vhodné provést experiment sestávající se z těchto dvou částí:

- 1) měnila se nastavovaná hloubka radiálního záběru  $a_e$  a zbylé řezné podmínky zůstávaly neměnné, tím se získaly závislosti sledovaných veličin na proměnlivé  $a_e$ ,
- 2) měnila se posuvová rychlost stolu  $v_f$  a zbylé řezné podmínky, včetně  $a_e$ , zůstaly neměnné, tím se získaly závislosti sledovaných veličin na proměnlivé  $v_f$ .

Navržené experimenty byly provedeny s odlišnými kotouči (kapitola 5.1) a materiály (kapitola 5.1). Tím bylo dosaženo výsledků pro různé vstupní parametry procesu broušení. V průběhu celého experimentu bylo dbáno na to, aby nedošlo k otupení kotouče (nutnost orovnění).

Pro ověření správnosti bylo měření zopakováno minimálně 5krát a následně statisticky vyhodnoceno. Naměřené hodnoty pro lepší přehlednost byly zpracovány do tabulek a grafického vyjádření. V rámci celkového vyhodnocení byl proveden rozbor

dosažených výsledků, který byl porovnán se známými předpoklady o procesu broušení, aby bylo možno určit, zda navržená měřicí zařízení plní svoji funkci.

## 5. Experimentální část

V této kapitole bude popsán průběh uskutečněného experimentu, který má dokázat funkčnost výše navrhovaného měřicího systému. Bude pojednáno o nutných přípravách před samotným procesem broušení na brusce BPH 320A, o instalaci a následné kalibraci jednotlivých zařízení měřicího systému. Dále bude uveden postup měření a zhodnocení zpracovaných výsledků měření.

### 5.1 Použité broušící nástroje a obráběný materiál

Pro navrhované měřicí systémy byla provedena zkouška na brusce BPH 320A. Měření bylo prováděno při rovinném broušení obvodem kotouče. Pro porovnání byly zvoleny dva druhy kotoučů, které se od sebe lišili především tvrdostí a zrnitostí. Každým kotoučem byly obráběny dva druhy materiálů při změnách řezných podmínek. Zvolené vzorky a jejich rozměry jsou uvedeny níže viz. vzorky obrobků.

#### Broušící kotouče:

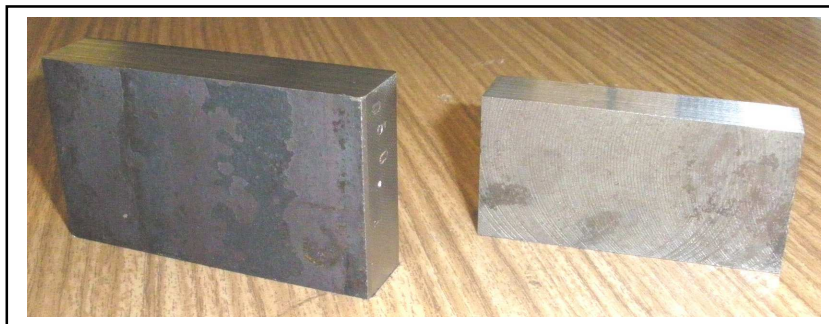
- kotouč číslo 1: typ kotouče 1-250x25x76-98A 46 K 9 V 01 C40 –  $40 \text{ m.s}^{-1}$  výrobce Carborundum electrite Benátky nad Jizerou (růžový korund, pojivo keramické),
- kotouč číslo 2: typ kotouče 1-250x32x76-88A 60 H 8 A V217 výrobce Tyrolit Benátky nad Jizerou (umělý korund bílý, pojivo keramické).

Pro lepší přehlednost budou broušící kotouče dále značeny jen jako kotouč číslo 1 a číslo 2.

#### Vzorky obrobků (obr. 13):

- vzorek A materiál 12050.1 – ocel normalizačně žíhaná, rozměry 6,8x3,8x1,5 mm,
- vzorek B materiál 14109.4 – chromová ocel na výrobu kuličkových ložisek, kalena, tvrdost 63HRc, rozměry 6,0x2,9x1,5 mm.

Pro lepší přehlednost budou obrobky dále značeny jen jako vzorek A a B.



*Obr. 13 Vzorky použitých obrobků*

## 5.2 Příprava kotouče před měřením

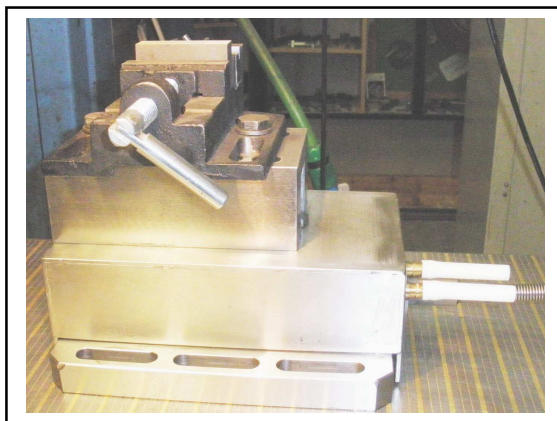
Použité kotouče byly před samotným upínáním na vřeteno brusky pečlivě prohlédnuty, nemají-li trhliny. Lehkým poklepem nekovovým předmětem bylo vyzkoušeno, zda vydávají jasný zvuk. To bylo bráno jako důkaz, že nejsou poškozeny. Nyní se mohl kotouč upnout do přírub. Mezi příruby a kotouč se po obou stranách vložil papír. Poté se přistoupilo ke statickému vyvažování, které bylo blíže popsáno v kapitole 2.1.4. Vyvažovací stojánek a přesný trn (obr. 3), na kterém se vyvažování provádělo, patří do standardního příslušenství stroje.

Při zkušebním chodu naprázdno byl proveden test přenosu vibrací z vřetene brusky na magnetický stůl brusky. Byl použit předmět kruhového tvaru s průměrem 23 mm a tloušťkou 2 mm. Daný předmět byl postaven hranou na stůl brusky a po dobu chodu naprázdno nespadl. To bylo bráno jako kladný výsledek testu a mohlo být přistoupeno k orovnávání brousicího kotouče jednokamenovým diamantovým orovnávačem (kapitola 2.1.6). Pomocí zařízení SBS Balance System model SB-4500 (kapitola 4.1.1) byl kotouč vyvažován i dynamicky přímo na vřeteni brusky za chodu, proto již nebylo nutné orovnaný kotouč znovu staticky vyvažovat.

## 5.3 Příprava dynamometru Kistler před měřením

Dynamometr se umístil do soustavy S–N–O–P, byl zachycen na magnetickém stole brusky a na něm byl připevněn zkoumaný obrobek. Před instalací dynamometru Kistler bylo však zapotřebí dynamometr očistit a připravit dle manuálu, který je k dispozici na pracovišti KOM tak, aby řádně plnil svou funkci. Především šlo o očištění technickým benzínem vnějších ploch kostry a nožového držáku

dynamometru. Nožový držák je připevněn deseti šrouby ke kostře dynamometru. Ty byly povoleny, aby bylo možné očistit stykovou plochu. Při zpětné montáži musely být šrouby namazány vazelínou a utahovány momentovým klíčem v přesném pořadí a správným momentem jak uvádí manuál. Do nožového držáku byl přišroubován svěřáček, ve kterém se šroubem uchytil vzorek (obr. 14).



*Obr. 14 Přichycení zkoumaného obrobku na dynamometru Kistler*

#### **5.4 Příprava ostatních snímačů a zařízení před měřením**

Indukčnostní snímač vzdálenosti BAW M08EI-UAD15B-BP03 byl připevněn imbusovými šrouby ke krytu broušicího nástroje tak, aby při odchodu třísek nebyl snímač poškozen. Řešením bylo umístění vpravo při pohledu zředu na brusku, jelikož kotouč se otáčel po směru hodinových ručiček – třísky tedy odlétávaly vlevo.

Dále byla využita měřicí zařízení, která jsou na brusce BPH 320A instalována trvale. Výsledky těchto měřicích zařízení byly ověřovány v minulosti. Jednalo se o indukčnostní snímač SPIRO pro měření rychlosti podélného posuvu stolu a optický snímač BMT OS041 pro měření otáček kotouče.

Všechna snímací zařízení byla připojena na měřicí kartu PCI-6023E, kde jsou výstupní napěťové signály převáděny na číslicové a dále jsou zpracovávány programem Labview. Propojení měřicích zařízení s osobním počítačem bylo provedeno ve spolupráci s odborníky z Fakulty mechatroniky TUL, kteří také provedli tvorbu vyhodnocovacího programu vyhodnoc1.vi a kalibračního programu kalibrace\_b.vi v programovacím prostředí Labview. Uvedené programy jsou součástí přílohy č. 1. Při spuštění měření musel být obrobek pod snímačem BAW, aby byla zanesena počáteční hladina obrobku.

## 5.5 Kalibrace

Před spuštěním měření na připravené měřicí aparatuře bylo nakonec nutné provést kalibraci jednotlivých částí. K tomu byl použit výše uvedený kalibrační program kalibrace\_b.vi. Brusku bylo nutné pokaždé před zahájením měření a vlastní kalibrací uvést do ustáleného tepelného stavu. Tento stav následoval po cca jedné hodině chodu stroje naprázdno.

Nyní bude popsána kalibrace jednotlivých částí. Do kalibračního programu bylo nutné zadat dvě rozdílné hodnoty, a to následovně:

- **Kalibrace rychlosti podélného posuvu stolu:**

*hodnota 1:* 0 – vypnutý posuv stolu,

*hodnota 2:* 12 – při zapnutém posuvu stolu ukazoval vyhodnocovací systém LIMAT hodnotu 0,2, tato rychlost je uváděna v  $\text{m.s}^{-1}$ , bylo třeba ji převést na  $\text{m.min}^{-1}$

$$v_f = 0,2 \text{ m.s}^{-1} = 0,2 * 60 \text{ m.min}^{-1} = 12 \text{ m.min}^{-1}.$$

- **Kalibrace otáček broušícího kotouče:**

*hodnota 1:* 0 – vypnuté otáčky vřetena brusky,

*hodnota 2:* 2635 – při zapnutých otáčkách vřetena brusky zobrazoval vyhodnocovací systém MERET 2635  $\text{ot.min}^{-1}$ , naměřené otáčky na dynamickém vyvažovacím systému byly shodné.

- **Kalibrace dynamometru Kistler:**

složka  $F_x$ : nebyla měřena, jelikož se zkoumaného obráběcího procesu neúčastní,

složka  $F_y$ : měření síly  $F_c$ ,

*hodnota 1:* 0 – na dynamometru upnut obrobek, soustava byla v klidu bez jakéhokoliv zatížení,

*hodnota 2:* 167 – mezi obrobek, upnutý na dynamometr, a kryt broušícího kotouče byl vlevo vzpříčen siloměr Force Gauge FG-5020 a ukazoval hodnotu síly 167,00 N, kterou soustava na sebe působila,

složka  $F_z$ : měření síly  $F_{cN}$ ,

*hodnota 1:* 0 – na dynamometru upnut obrobek, soustava byla v klidu bez jakéhokoliv zatížení,

*hodnota 2:* 73,6 – na obrobek, upnutý na dynamometr, bylo položeno kalibrační těleso, které v gravitačním poli Země působí na podložku silou 73,6 N.

▪ **Kalibrace úbytku obrobku:**

*hodnota 1: 0* – brousicím kotoučem bylo třeba určit nulový bod obrobku, poté se za klidu stroje najelo do polohy, kdy byl obrobek pod snímačem BAW (kapitola 4.4) a pomocí dílenských koncových měrek (spároměr) se snímač zaaretoval 1,15 mm nad povrchem obrobku,

*hodnota 2: 250* – po kalibraci nulové hodnoty se najelo ručním posuvem příčného suportu brusky o 250  $\mu\text{m}$  nahoru (obtočíme jednou do kola po směru hodinových ručiček), obrobek musel být pod čidlem BAW.

Následně byla provedena kontrola zobrazovaných hodnot v programu vyhodnoc1.vi. Pokud se naměřené hodnoty neshodovaly se skutečnými musela být v programu provedena korekce konstant.

Po všech výše uvedených krocích mohlo být přistoupeno k samotnému měření, které bude dále popsáno.

## 5.6 Popis měření

Ke sledování složek řezné síly, rychlosti stolu, úbytku obrobku a otáček kotouče byla navržena dvě měření:

- posuvová rychlost stolu  $v_f=12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (konstantní),  
změna hloubky záběru  $a_e=20, 30, 40, 50 \mu\text{m}$ ,
- hloubka záběru  $a_e=30 \mu\text{m}$  (konstantní),  
změna rychlosti stolu  $v_f=4, 8, 12, 16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Obě měření byla provedena u obou kotoučů a s oběma vzorky. Pro každé nastavení bylo provedeno 5 měření. Do vyhodnocovacího programu se nastavila vzorkovací frekvence 23000, to odpovídá 23 sekundám. Během tohoto času došlo k dostatečnému vyjiskření a poslední zdvih mohl být brán jako nastavení nulového bodu obrobku pro následující měření. Pouze při  $v_f \leq 8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , musela být vzorkovací frekvence nastavena na 30000, tedy 30 sekund, aby došlo k dostatečnému úběru obrobku.

Vyhodnocovací program naměřené hodnoty zpracovával do grafů (ukázka grafů je uvedena v příloze č. 2). Komplettní sada grafů je nahrána na přiloženém CD, které tvoří přílohu č. 1. Z těchto grafů byly hodnoty jednotlivých snímačů odečteny do tabulek (příloha č. 3) sestrojených v programu Excel, ve kterém byly následně



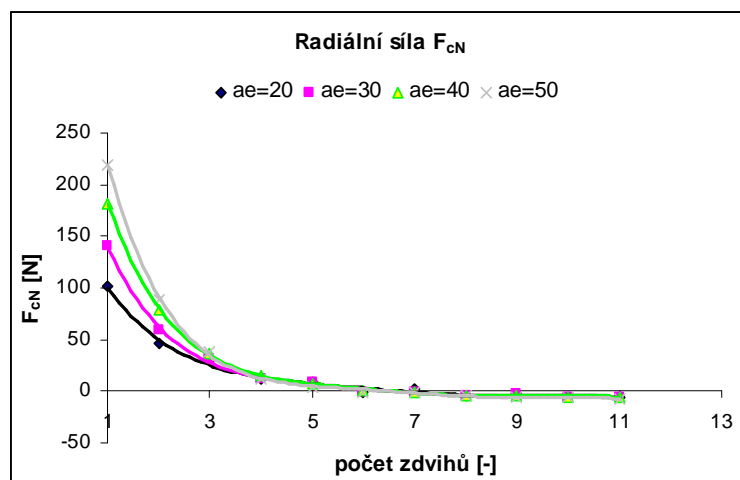
statisticky zpracovány. Pro lepší přehlednost byly sestrojeny grafy taktéž v programu Excel.

## 5.7 Zpracování výsledků měření a jejich vyhodnocení

Nyní budou popsány vztahy mezi získanými jednotlivými výstupními veličinami a to pomocí grafů, které byly sestrojeny z průměrných hodnot daných měření. Vztahy se budou zkoumat pro dva rozdílné broušící kotouče a dva odlišné obrobky. Pro přehlednost budou výsledky měření pro jednotlivé broušící kotouče rozděleny do oddílů. Metodika měření je uvedena v kapitole 4.7.

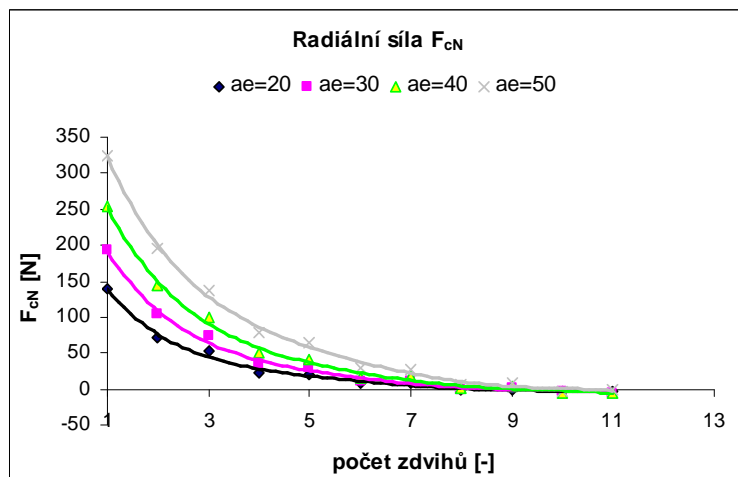
### 5.7.1 Broušící kotouč číslo 1

Brusným materiálem je růžový korund stmelený keramickým pojivem. Průměr kotouče po orovnání byl 241 mm. Pokusy byly pro porovnání prováděny na dvou obrobkách (vzorek A, B). Nejprve bude vyhodnoceno měření při konstantní rychlosti.



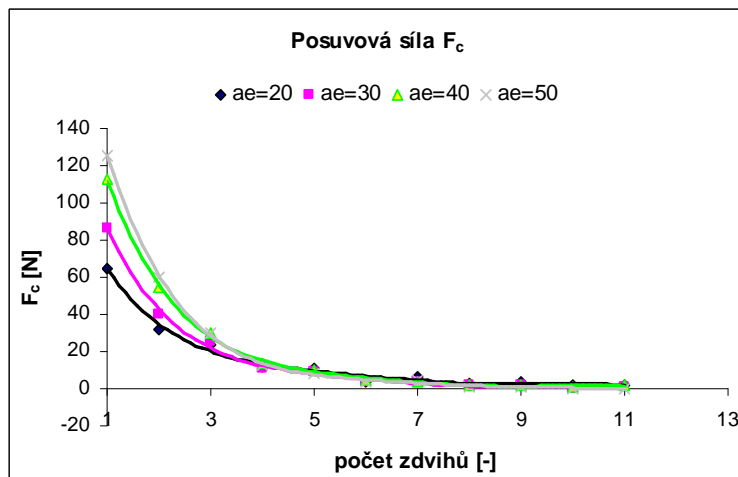
Obr. 15 Radiální síla pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$

$$a \text{ } v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

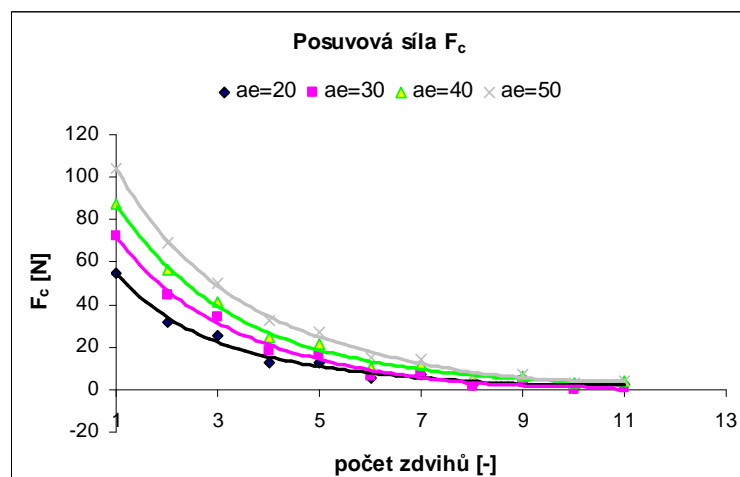


Obr. 16 Radiální síla pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a_v = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Při zkoumání velikosti řezných sil při broušení má největší význam složka radiální. Právě ta způsobuje rozhodující zatížení soustavy S–N–O–P. Z grafů (obr.15 a obr. 16) je patrné, že s rostoucí hloubkou záběru roste i velikost radiální síly, jakožto složky řezné síly. K vyjiskření dochází ve stejném čase při shodném počtu zdvihů bez ohledu na měněný parametr  $a_e$ . Při broušení vzorku B je oproti vzorku A řezná síla větší, pravděpodobně je to způsobené větší tvrdostí vzorku B.

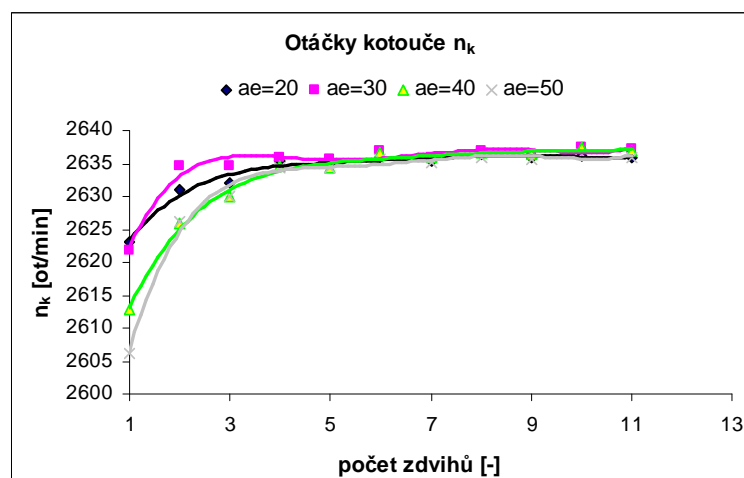


Obr. 17 Posuvová síla pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a_v = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

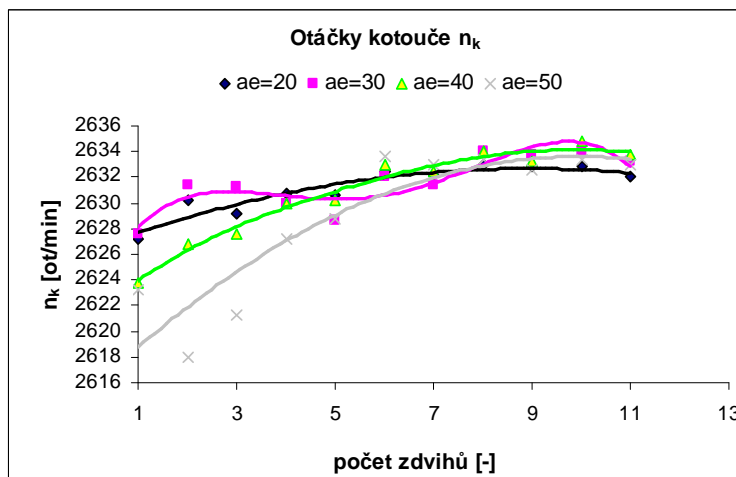


Obr. 18 Posuvová síla pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Na grafech (obr.17 a obr. 18) jsou vidět průběhy složky řezné síly ve směru posuvu. Podle obecně známých předpokladů je tato složka menší než složka radiální a opět s větší hloubkou záběru roste. Pro tvrdší vzorek B jsou posuvové síly menší než u vzorku A, celková řezná síla se tak sklání více k radiální ose. K vyjiskření dochází při shodném počtu zdvihů i při různých hloubkách záběru.



Obr. 19 Otáčky kotouče pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

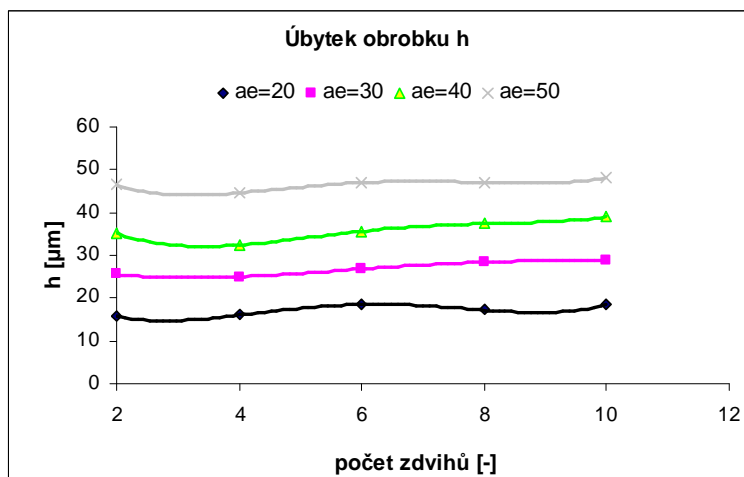


Obr. 20 Otáčky kotouče pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$

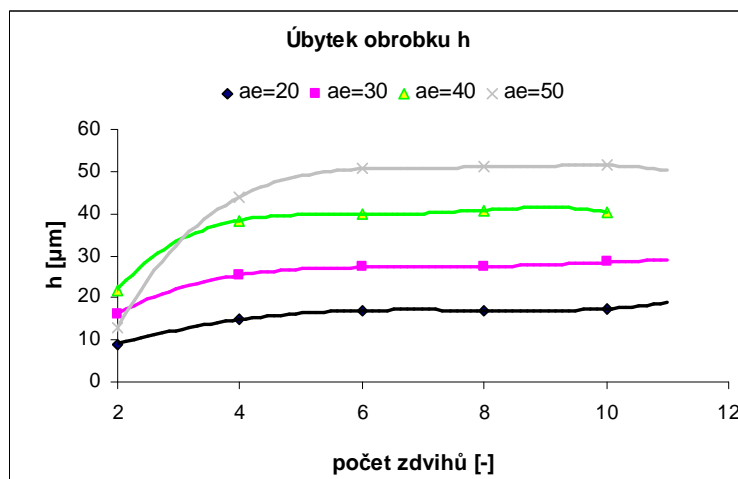
$$a \ v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Při prvním záběru se otáčky kotouče dostávají na minimum a s rostoucím počtem zdvihů se vracejí na hodnoty při chodu naprázdno. Je to způsobené tím, že na otáčející se brusný kotouč působí obrobek, tím vzniká posuvová složka řezné síly. Jak roste posuvová síla (obr. 17 a obr. 18), tak klesají otáčky kotouče (obr. 19 a obr. 20). Pokud průběh velikosti posuvové síly klesá rychleji, tak i otáčky kotouče rostou rychleji. S nastavením větší hloubky záběru otáčky klesají, jelikož na kotouč působí větší síly.

První zdvih je uskutečněn po směru otáčení brusného kotouče a tudíž i každý lichý zdvih. Při každém sudém zdvihu působí obrobek při odebrání třísky proti směru otáčení brusného kotouče. Proto nerostou otáčky hladce a můžeme vypořizovat drobné rozdíly ve velikosti otáček kotouče při lichém a sudém pracovním záběru. Při sudých otáčkách je kotouč o nepatrnou hodnotu více bržděn. Tento jev je patrný i u složek řezné síly, především u obrábění tvrdšího vzorku B.



Obr. 21 Úbytek obrobku pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a \ v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

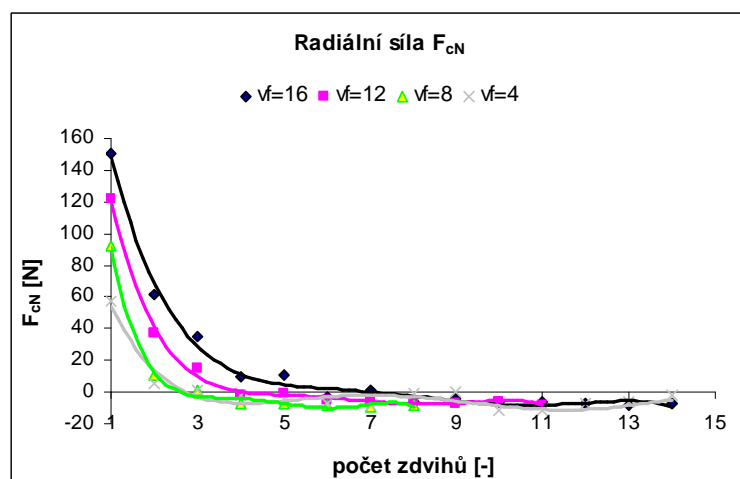


Obr. 22 Úbytek obrobku pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$   
 $a \ v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

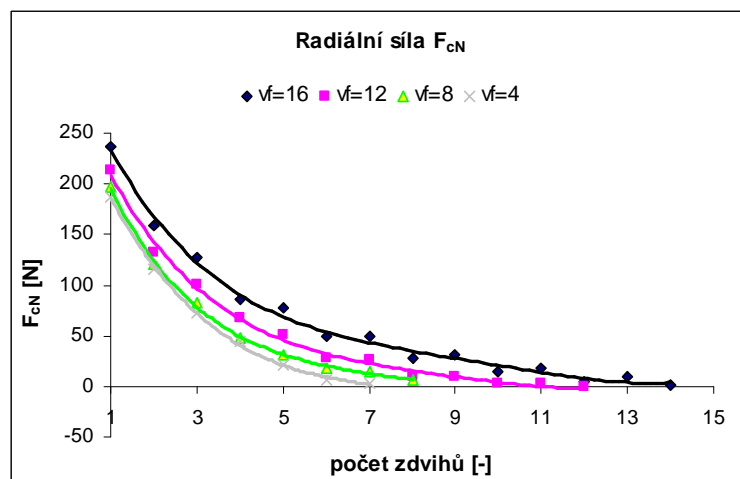
Jelikož pro snímání úbytku obrobku bylo k dispozici pouze jedno čidlo, nebylo možné provést měření po každém zdvihu. Umístění čidla se zvolilo na té straně krytu kotouče, kam neodchází třísky, aby se zamezilo poškození snímače. Proto je úbytek obrobku změřen pouze po každém sudém zdvihu. U vzorku A, který je z měkkého materiálu, došlo k úběru nastavené hloubky záběru již při prvních dvou zdvizích (obr. 21). U vzorku B (obr. 22) dochází k největšímu odběru materiálu při prvním záběru a postupně se přírůstek úbytku zmenšuje. S přibývajícím počtem zdvihů se hodnoty úbytku blíží k nastavené hloubce záběru.

Tento kotouč, dle specifikace výrobce, se má používat na broušení oceli do tvrdosti 55 HRC. Vzorek B tuto mez překračuje, což se nejvíce projevilo při obrábění s nastavenou hloubkou záběru  $a_e = 50 \mu\text{m}$ .

Nyní bude popsáno vyhodnocení pro konstantní hloubku záběru.

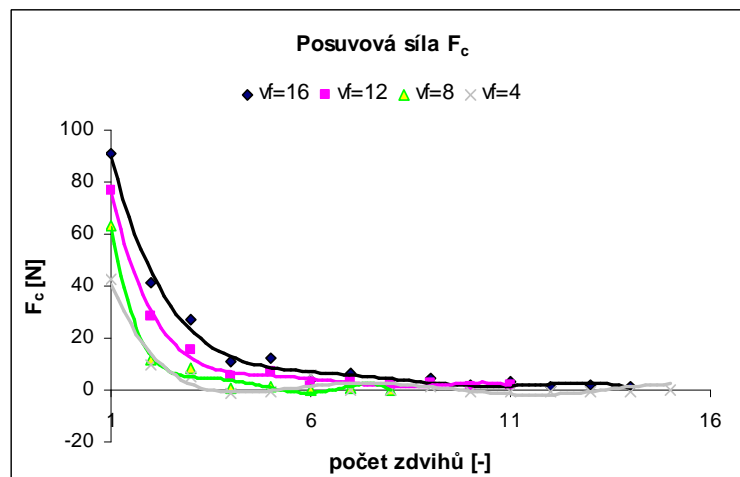


Obr. 23 Radiální síla pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
 $a a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$

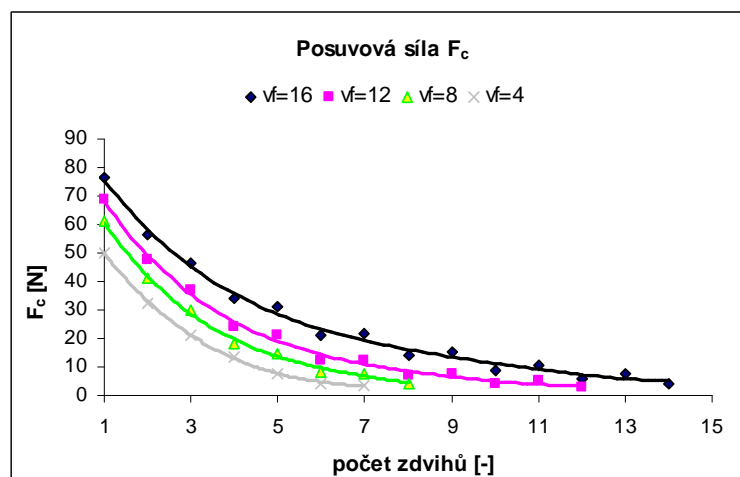


Obr. 24 Radiální síla pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
 $a a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$

Z grafů (obr. 23 a obr. 24) lze vidět, že radiální složka řezné síly je větší při vyšších rychlostech posuvu stolu. Neboť zrna brousicího kotouče nemají tolik času na úběr materiálu z obrobku a dochází k většímu napružení soustavy S–N–O–P, proto také dochází k vyjiskření při vyšších rychlostech až po větším počtu zdvihů než při nižších rychlostech. U tvrdšího vzorku B vychází radiální řezné síly opět vyšší a klesají pomaleji než u měkčího vzorku A.

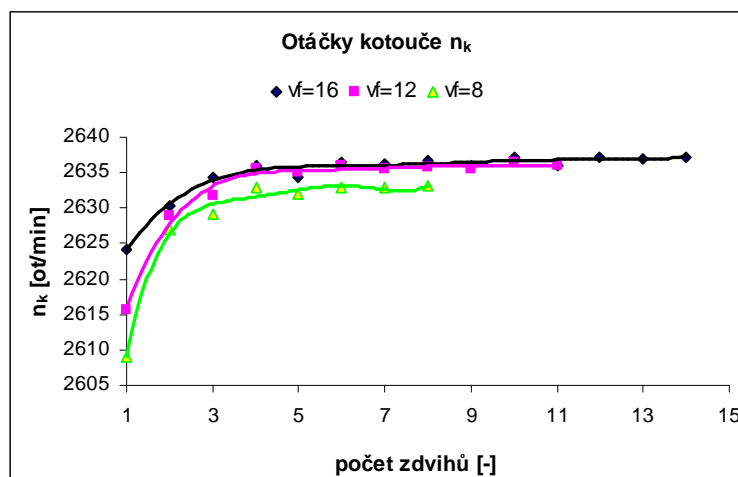


Obr. 25 Posuvová síla pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$

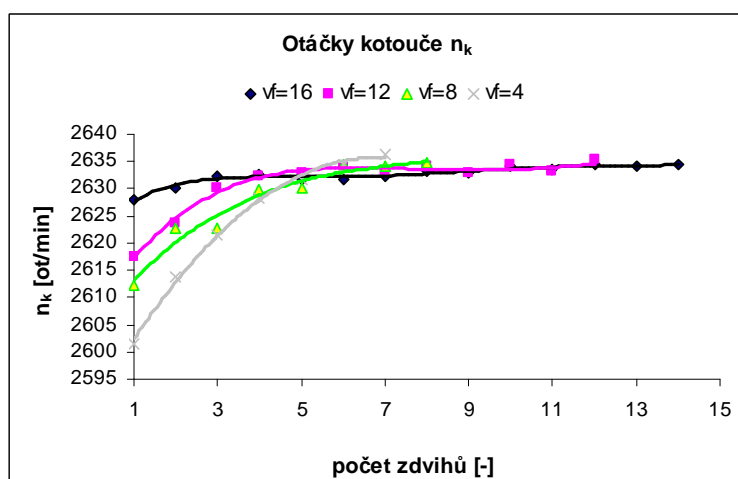


Obr. 26 Posuvová síla pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$

Vyhodnocení posuvové složky řezné síly je vidět v grafech (obr. 25 a obr. 26). Při vyšších posuvových rychlostech dochází ke zvýšení i této složky řezné síly. Lze tedy vyvodit závěr, že s rostoucí posuvovou rychlostí vzrůstá celková řezná síla a k požadovanému úběru materiálu dojde při vyšším počtu zdvihů. Pro vzorek B jsou hodnoty posuvové síly nižší než pro vzorek A. To značí, že celková řezná síla se u tvrdšího materiálu více přiblíží k radiální ose.



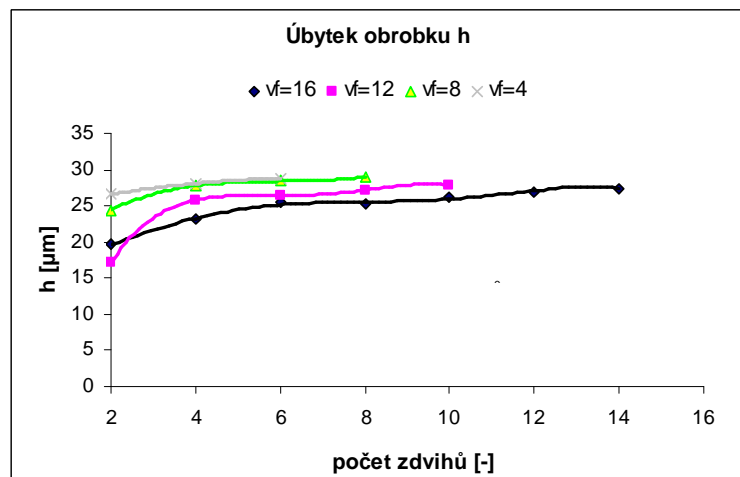
Obr. 27 Otáčky kotouče pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu  $v_f$   
 $a_{e_{\text{konst}}} = 30 \mu\text{m}$



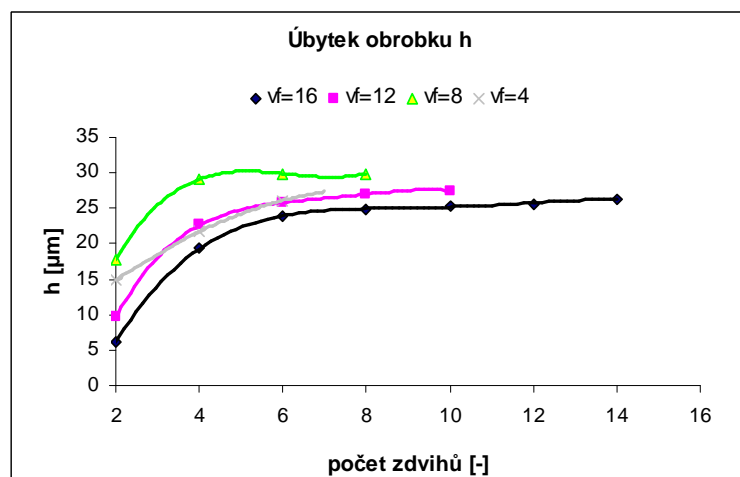
Obr. 28 Otáčky kotouče pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu  $v_f$   
 $a_{e_{\text{konst}}} = 30 \mu\text{m}$

Naměřené otáčky kotouče byly zpracovány do grafů (obr. 27 a obr. 28). Otáčky kotouče se opět dostávají na minimum při prvním zdvihu a pak se postupně vracejí na svojí hodnotu při chodu naprázdno. Při nižších posuvových rychlostech klesnou otáčky kotouče více. Dále zde platí stejné poznatky jako jsou uvedeny u otáček kotouče při konstantní  $v_f$  a změnách  $a_e$ .





Obr. 29 Úbytek obrobku pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
 $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$



Obr. 30 Úbytek obrobku pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
 $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$

Na grafech (obr. 29 a obr. 30) je znázorněn průběh úbytku obrobků. Čím větší je nastavená posuvová rychlost, tím dochází k pomalejšímu úbytku obrobku a je zapotřebí vykonat více zdvihů, aby došlo k vyjiskření.

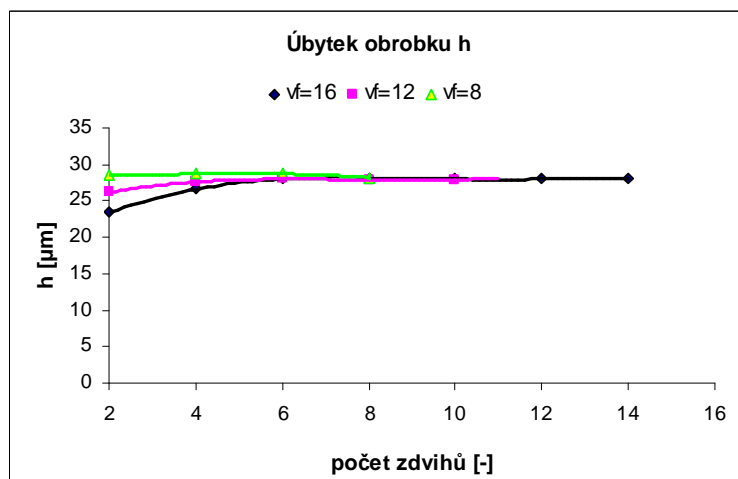
U vzorku A největší úběr materiálu nastává při prvních zdvizích a s dalšími zdvihy přírůstek úbytků materiálu klesá. Po vyjiskření se celkový úbytek obrobku blíží k nastavené hloubce záběru  $a_e$ . U vzorku B je opět patrné, že brousicí kotouč není určen pro obrábění daného materiálu.

## 5.7.2 Broušící kotouč číslo 2

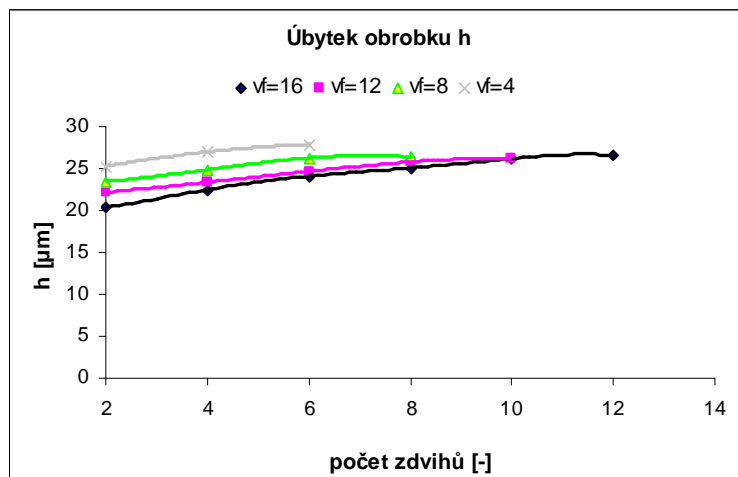
Brusným materiálem je bílý korund stmelený keramickým pojivem. Průměr kotouče po orovnění byl 227 mm. Tento kotouč je oproti kotouči číslo 1 měkčí, má jemnější zrnitost a hutnější strukturu. Pokusy byly opět prováděny na dvou obrobcích (vzorek A, B).

Naměřené hodnoty při konstantní  $v_f$  a změnách  $a_e$  jsou graficky znázorněny v příloze číslo 4. Průběhy křivek jsou obdobné jako u kotouče číslo 1 při stejných řezných podmínkách. Pouze velikosti složek řezné síly jsou menší a způsobují tedy menší namáhání soustavy S–N–O–P. Nedochozí k takovému snížení řezné rychlosti nástroje tj. otáček kotouče. U úbytku obrobku se hodnoty méně blíží nastavené hloubce záběru.

Naměřené hodnoty při konstantní  $a_e$  a změnách  $v_f$  jsou graficky zobrazeny v příloze číslo 5. Průběhy složek řezné síly se pro oba materiály opět podobají výsledkům dosažených s kotoučem číslo 1. Pouze se liší svou maximální velikostí, jsou podstatně menší a se zvyšováním rychlosti  $v_f$  se přírůstek síly zmenšuje. Měkčí kotouč nesnese takové zatížení a dochází k rychlejšímu vylamování zrn z broušícího nástroje. Tato hypotéza nebyla ověřena, jelikož nebyl měřen úbytek brusného kotouče. Otáčky kotouče neklesly na tak nízké hodnoty, ale v podstatě jsou průběhy křivek podobné jako v případě měření s kotoučem číslo 1. Přitom závislost na posuvové rychlosti není tak zřejmá.



Obr. 31 Úbytek obrobku pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu  $v_f$   
 $a$   $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$  (kotouč číslo 2)



Obr. 32 Úbytek obrobku pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$   
a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$  (kotouč číslo 2)

Úbytky obrobků jsou ve výše uvedených grafech (obr. 31 a obr. 32). Úbytek u vzorku A byl změřen dle předpokladu oproti kotouči číslo 1. Při nastavení vyšší řezné rychlosti dochází k pomalejšímu ubírání materiálu z obrobku. Celkový úbytek se blíží nastavené hloubce záběru. S vyšším počtem zdvihů se přírůstek úbytku zmenšuje, oproti tomu je u vzorku B přírůstek úbytku téměř konstantní. Na vzorku B se s vyšší posuvovou rychlostí hodnota celkového úbytku blížila stále více k nastavené hloubce záběru.

Při obrábění vzorku A kotoučem číslo 2 při posuvové rychlosti  $v_f = 4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  přestal být posuv brusky plynulý. V zadní části brusky začala vytékat kapalina z hydraulického zařízení pro posuv stolu. Tuto závadu se nepodařilo odstranit, proto nemohlo být měření uskutečněno. Jelikož data nebylo možné získat, nedošlo k jejich vyhodnocení. Toto nastavení bylo provedeno jako poslední, proto zmiňovaná závada nemohla ovlivnit předchozí měření a výsledky bylo možné vyhodnotit.

## 6. Závěr

Bakalářská práce se zabývala hodnocením procesu broušení při zápichovém rovinném broušení na brusce BPH 320A. Byly navrženy a následně ozkoušeny měřicí systémy vybraných veličin.

Pro ověření byly zvoleny dva odlišné kotouče a dva obrobky s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Každým kotoučem byly postupně obráběny oba vzorky. Výstupní veličiny byly měřeny při konstantní posuvové rychlosti v závislosti na proměnné hloubce záběru a při stejném nastavení hloubky záběru v závislosti na proměnné rychlosti posuvu stolu. Měřeny byly složky řezné síly, úbytek materiálu, otáčky brusného kotouče a rychlost posuvu stolu.

Pro měření složek řezné síly byl použit dynamometr Kistler. Výsledky jeho měření by bylo vhodné ověřit tenzometrickým dynamometrem, který byl sestrojen na KOM. Pokud by byly výsledky z tohoto zařízení dostačující, mohl by být tenzometrický dynamometr umístěn na experimentální pracoviště natrvalo. Toto zařízení je totiž podstatně levnější.

Úbytek materiálu se měřil pomocí indukčnostního snímače od firmy Balluw. Pro svůj účel se zařízení osvědčilo, ale pro ucelenější výsledky je nutné upravit měřicí systém tak, aby byla velikost obrobku změřena před vstupem do broušicího procesu. Pro přesnější výsledky měření by případně mohlo být pořízeno ještě jedno takové čidlo. To by umožnilo měřit úbytek obrobku po každém zdvihu. Provedením těchto změn by broušicí proces byl mnohem lépe monitorovatelný.

Navrhované měřicí systémy pro snímání otáček brusného kotouče a rychlosti posuvu stolu svoji funkci plnily výborně.

Vzhledem k nezvyklému chování brusky při závěrečném měření při nízkých rychlostech posuvu stolu je třeba doporučit provést údržbu brusky a kontrolu jejích funkcí. Po tomto kroku by bylo možné zopakovat experiment a porovnat nově získané poznatky s výsledky dosaženými v této práci.

Naměřené výsledky sledovaných veličin by bylo možno použít k následnému zpracování a určit např. obrobitelnost daných materiálů a řezivost nástrojů. Tím se však tato práce nezabývala.

Pro ucelenější posuzování efektivnosti procesu broušení by bylo nutné do měřicí aparatury připojit vhodně zvolené zařízení pro úbytek kotouče a také sledovat kvalitu obrobené plochy, která se však řadí mezi technické veličiny, tudíž o ní v práci nebylo

pojednáno. Tímto by se mohly zabývat jiné práce, které by navázaly na tuto bakalářskou práci.

## Seznam použité literatury

- [1] *Nejstarší broušená sekera pochází z Austrálie* (novinový článek). [online]. Praha: Český rozhlas, 2010. Dostupné na: <http://www.rozhlas.cz>.
- [2] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. Kapitola: Broušení, s. 169-195. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] VLACH, B. *Technologie obrábění*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 1989. 263 s.
- [4] VLACH, B., aj. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1990. 464 s. ISBN 80-03-00143-9.
- [5] DRÁB, V., aj. *Technologie 1*. 2.vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1985. Kapitola: Broušení, s. 127-141. Kapitola: Kvalitativní hodnocení obrábění, s. 220-225.
- [6] MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979. 248 s.
- [7] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. 3.vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury / Bratislava: ALFA, 1982. Kapitola: Broušení, s. 98-106.
- [8] HLUCHÝ, M., HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2 – Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 1.vyd. Praha: Scientia, 1998. Kapitola: Broušení materiálů, s. 82-84. ISBN 80-7183-127-1.
- [9] VIGNER, M., PŘIKRYL, Z., aj. *Obrábění*. 1.vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. Kapitola: Broušení, s. 348-406.
- [10] GAZDA, J., aj. *Teorie obrábění – Řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Liberec: Editační středisko VŠST, 1993. 111-123 s. ISBN 80-7083-110-3.
- [11] BARTUŠEK, T. *Účinek procesní kapaliny na technologii broušení a kvalitu obrobených součástí*. [Diplomová práce]. Liberec: TU v Liberci, KOM, 2008. 68s.
- [12] ŽIŽKA, J. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. 106 s. ISBN 80-7083-687-1.

- [13] BURIAN, J. *Experimentální pracoviště pro studium obrobitelnosti broušením* [Závěrečná práce]. Liberec: TU v Liberci, KOM, 1990. 46s.
- [14] ŽIVNÝ, M. *Příspěvek k experimentálnímu vyhodnocování procesu broušení*. [Diplomová práce]. Liberec: TU v Liberci, KOM, 2001. 93s.
- [15] POHOŘALÝ, M. *Měřicí systém pro snímání technologických parametrů na brusce BPH 320A*. [Diplomová práce]. Liberec: TU v Liberci, KOM, 2002. 72s.
- [16] MATYÁŠ, R. *Využití signálu z dynamometru Kistler pro řízení brusky BPH 320A*. [Diplomová práce]. Liberec: TU v Liberci, KOM, 2009. 73s.

## Seznam příloh

Příloha 1	(CD)
Vstupní a výstupní hodnoty řešení	
Příloha 2	(2 strany)
Ukázka naměřených hodnot zpracovaných do grafů programem vyhodnoc1.vi	
Příloha 3	(31 stran)
Tabulky s naměřenými hodnotami odečtených z grafů vyhodnocovacího programu	
Příloha 4	(3 strany)
Grafické znázornění hodnot pro kotouč číslo 2 (vzorek A, B) při konstantní $v_f$ a změnách $a_e$	
Příloha 5	(2 strany)
Grafické znázornění hodnot pro kotouč číslo 2 (vzorek A, B) při konstantní $a_e$ a změnách $v_f$	



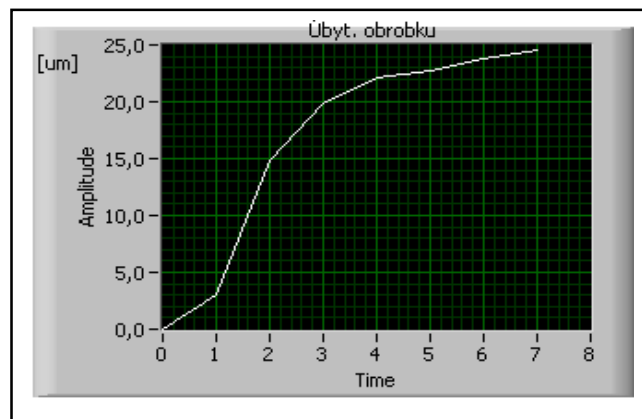
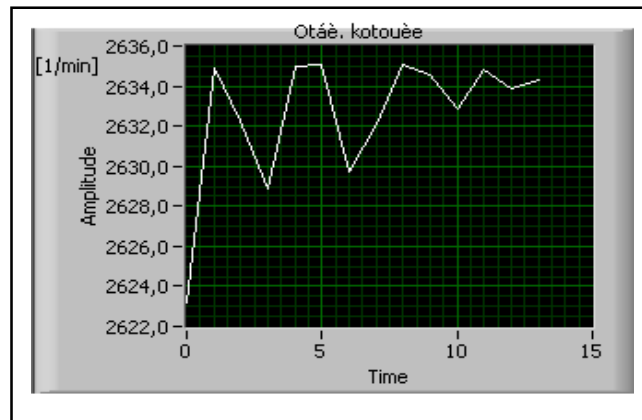
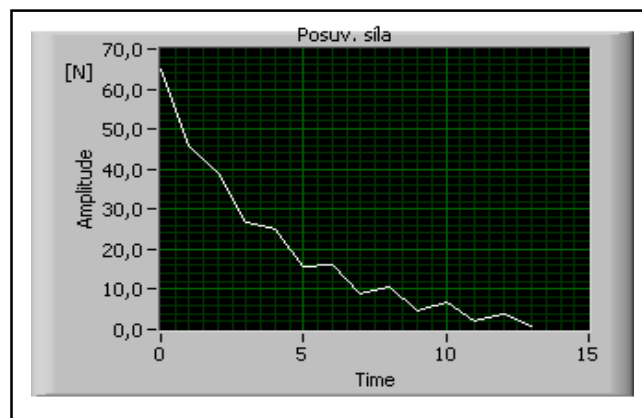
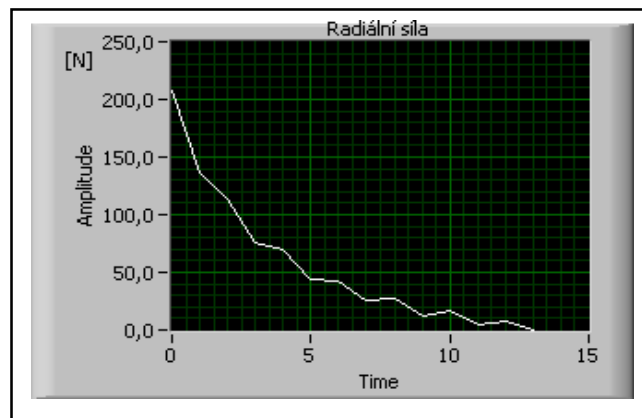
## **Příloha 1**

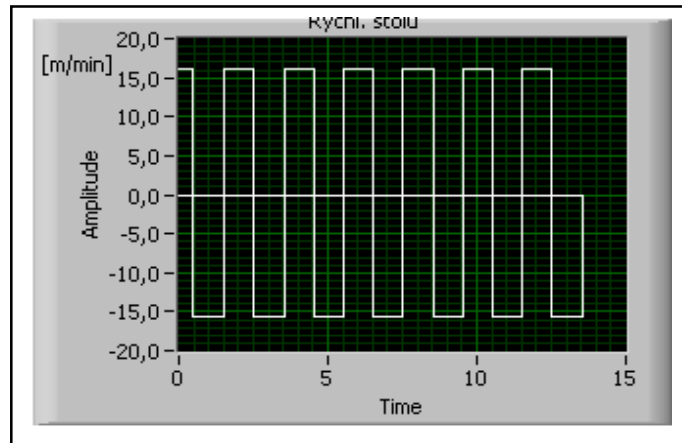
### **Vstupní a výstupní hodnoty řešení**

## **Příloha 2**

**Ukázka naměřených hodnot zpracovaných do grafů programem vyhodnoc1.vi**

Kotouč číslo 1, vzorek B,  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$ ,  $v_f = 16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , měření číslo 5





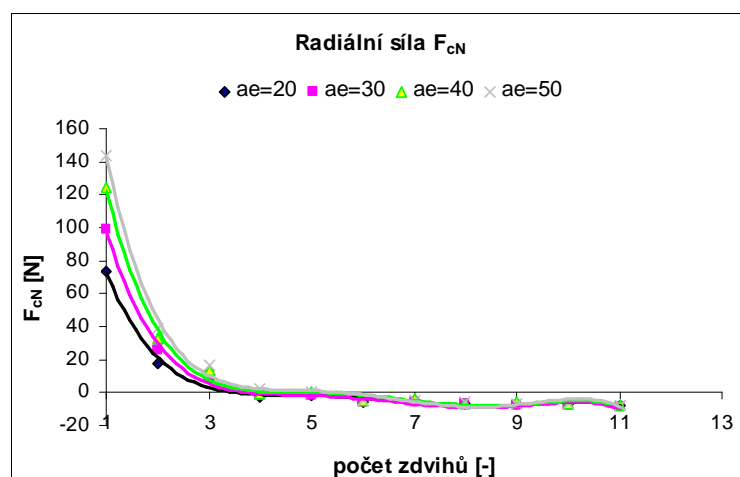
## **Příloha 3**

**Tabulky s naměřenými hodnotami odečtených z grafů vyhodnocovacího programu**

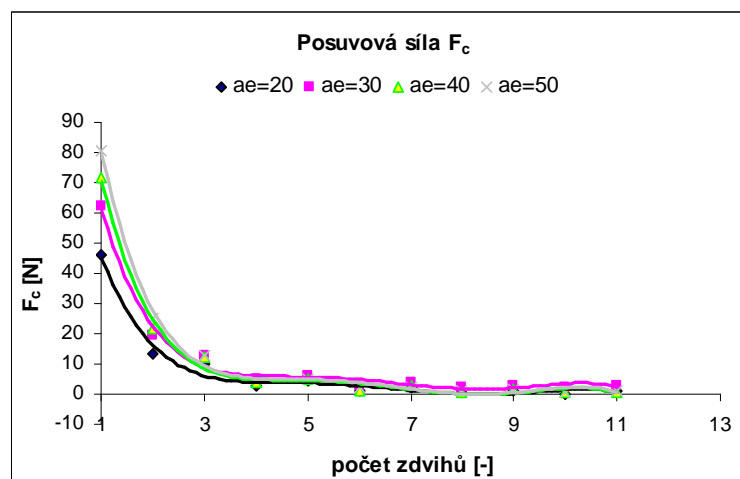
## **Příloha 4**

**Grafické znázornění hodnot pro kotouč číslo 2 (vzorek A, B) při konstantní  $v_f$  a změnách  $a_e$**

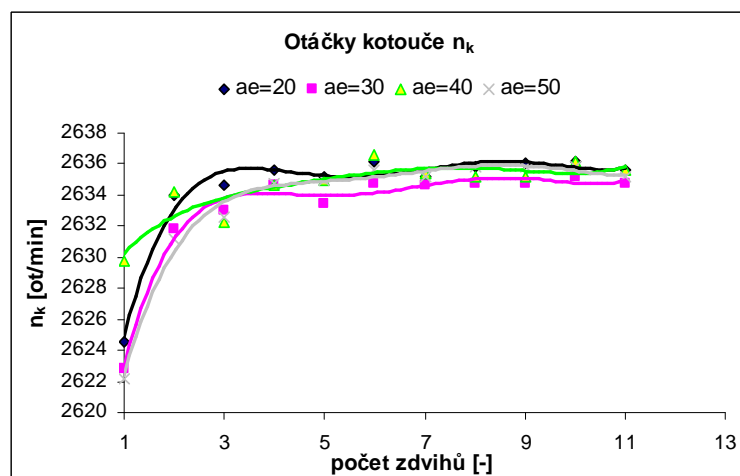
*Radiální síla pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$*



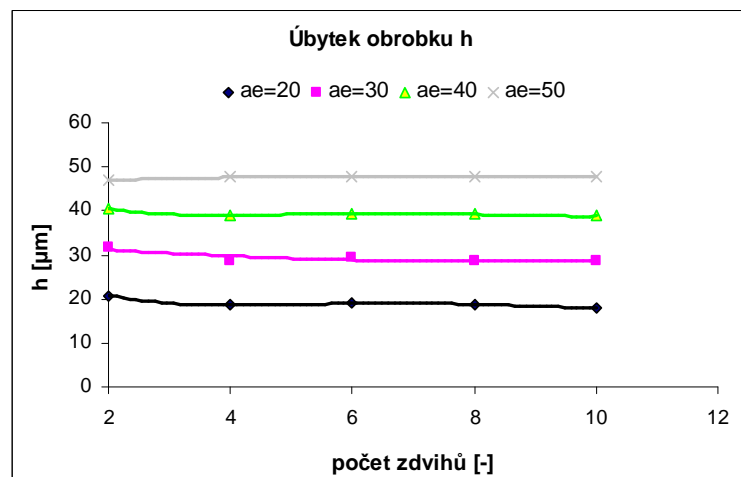
*Posuvová síla pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$*



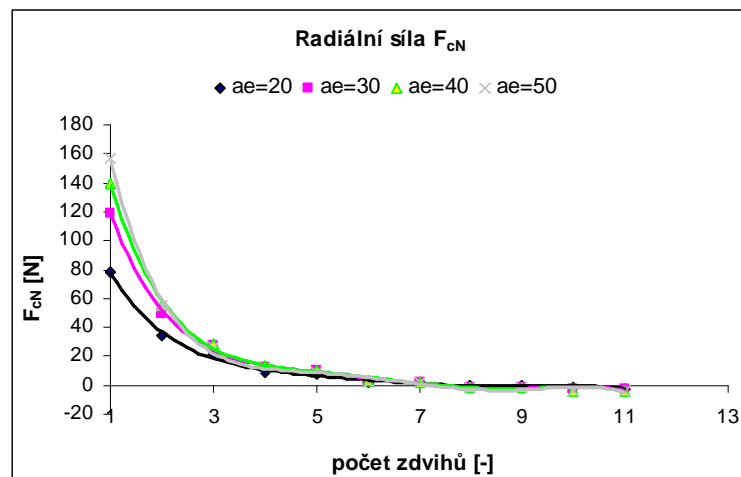
*Otáčky kotouče pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$*



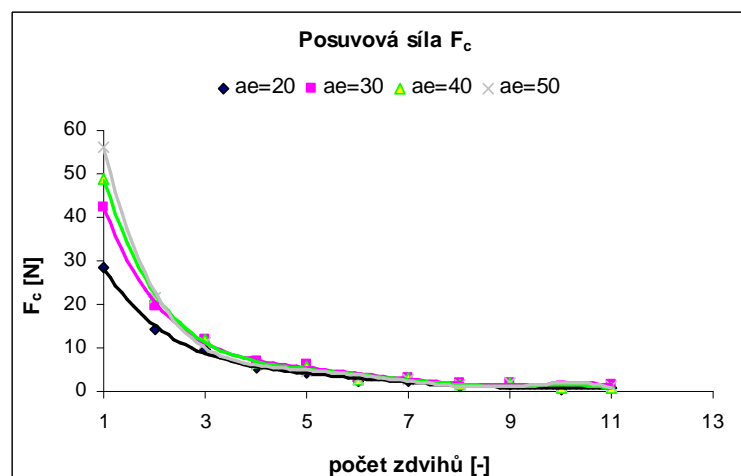
Úbytek obrobku pro vzorek A při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Radiální síla pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

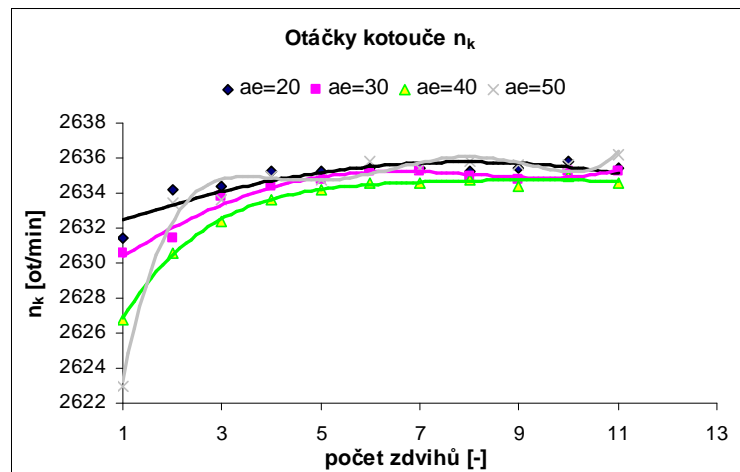


Posuvová síla pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

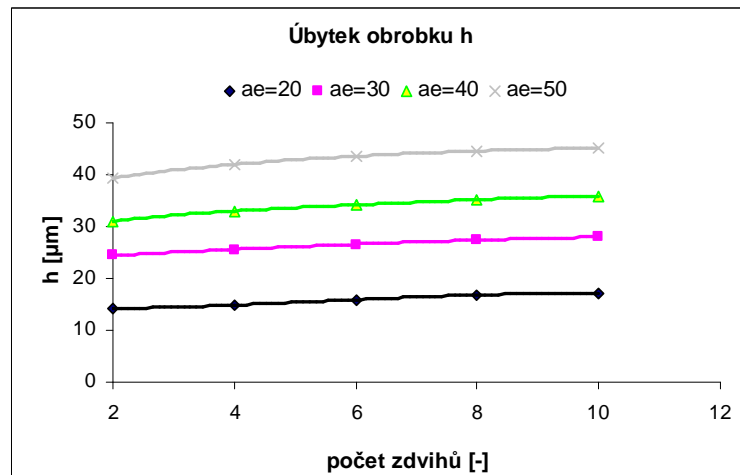




Otáčky kotouče pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



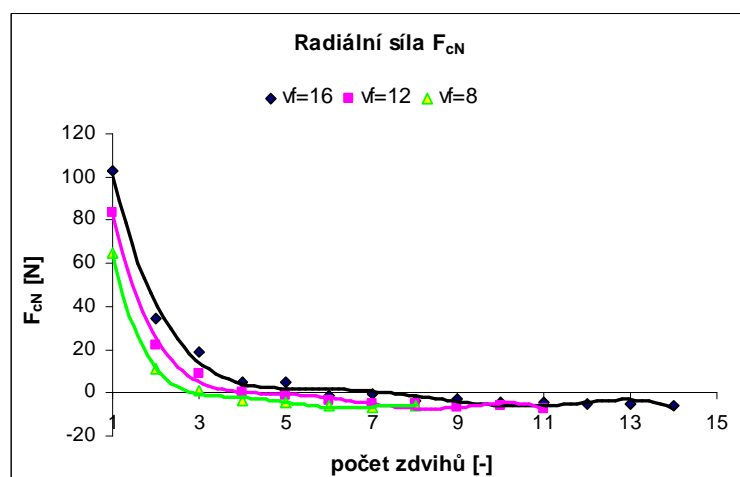
Úbytek obrobku  $h$  pro vzorek B při změnách hloubky záběru  $a_e$  a  $v_f = \text{konst} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



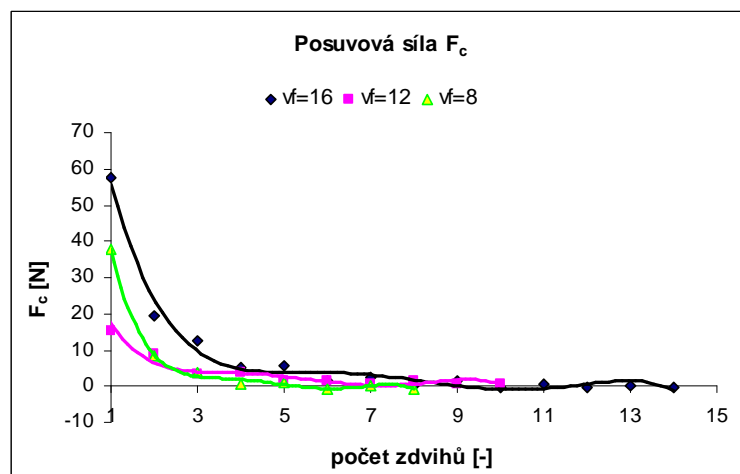
## **Příloha 5**

**Grafické znázornění hodnot pro kotouč číslo 2 (vzorek A, B) při konstantní  $a_e$  a změnách  $v_f$**

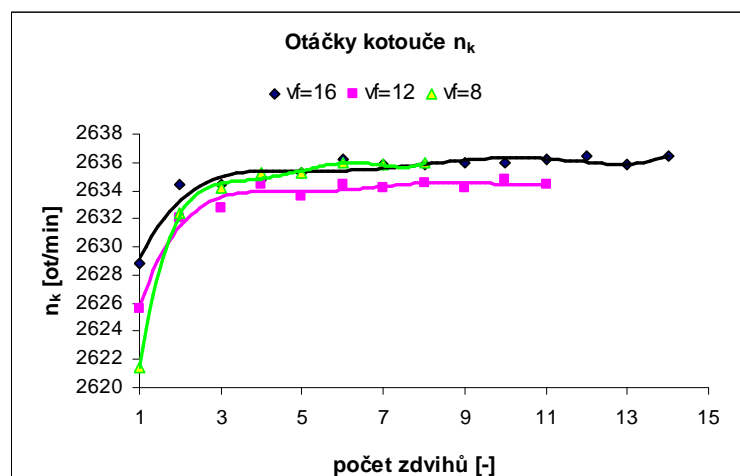
Radiální síla pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$



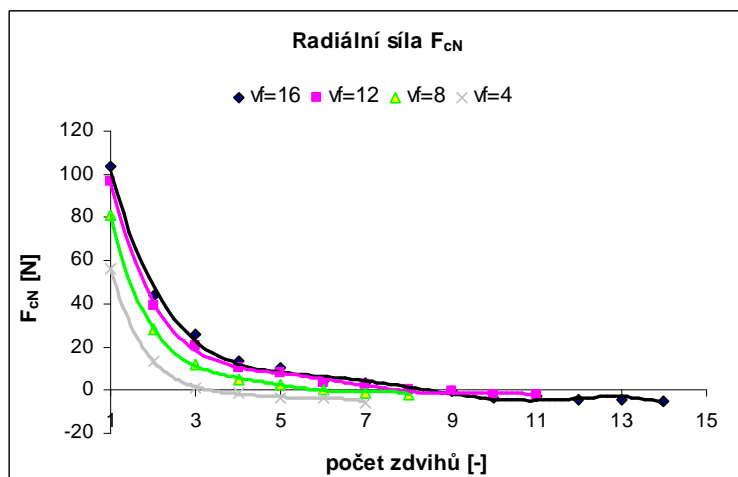
Posuvová síla pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$



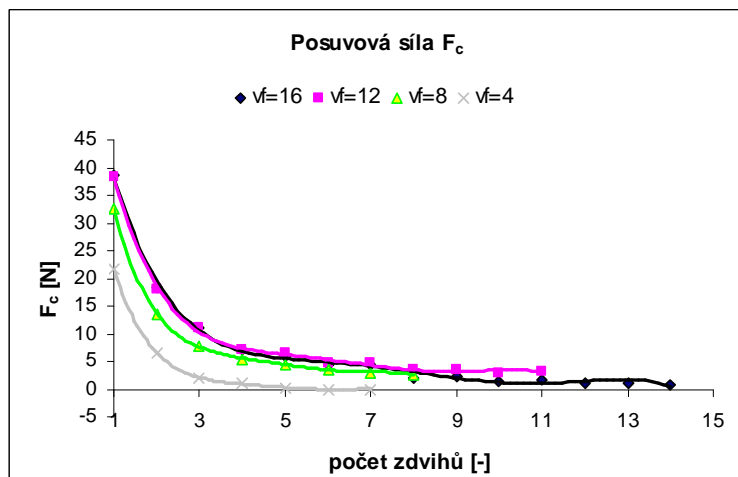
Otáčky kotouče pro vzorek A při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$



*Radiální síla pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$*



*Posuvová síla pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$*



*Otáčky kotouče pro vzorek B při změnách rychlosti posuvu stolu  $v_f$  a  $a_e = \text{konst} = 30 \mu\text{m}$*

